



Université Djillali Liabès
Laboratoire de Génie Civil
et Environnement



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Djillali Liabès

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil & Travaux Publics

Thèse de Doctorat
Spécialité : Génie Civil
Option : Géotechnique et matériaux

**Etude expérimentale des bétons légers
Incorporant des granulats issus du broyage Des
pneus usés**

Présenté par

M^{me} MEDINE Malika

Soutenue à Sidi Bel Abbès le 08/03/2018 Devant le jury composé de :

Mr. ASROUN Aissa	Professeur	UDL Sidi Bel Abbès	Président
Mr. GHERNOUTI Youcef	Professeur	UMB Boumerdes	Examineur
Mr. BOUZIANI Tayeb	Maitre de conférences A	UAT Laghouat	Examineur
Mr. BENRAHOU Kouider Halim	Professeur	UDL Sidi Bel Abbès	Invité
Mr. TROUZINE Habib	Professeur	UDL Sidi Bel Abbès	Encadreur

Remerciements

Les travaux de thèse présentés dans le présent manuscrit, ont été réalisés à l'université **DJILLALI LIABES** à Sidi Bel Abbes, au laboratoire de Génie Civil et de l'Environnement.

En tout premier lieu, je remercie **Allah** le tout-puissant de m'avoir donné la force pour poursuivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés et les contraintes.

Je voudrais témoigner ma grande reconnaissance à Monsieur **TROUZINE HABIB**, professeur, à l'Université Djillali Liabes à Sidi Bel Abbes, pour avoir assuré la direction de cette thèse. Je voudrais le remercier pour ses conseils toujours pertinents et constructifs et l'aide précieuse qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de cette recherche. Ses qualités honorables et inestimables m'ont apporté le courage et l'envi d'être à la hauteur. Ses compétences et ses encouragements constants, ont permis à ce travail de voir le jour. Avec lui, j'ai appris à ne pas avoir peur à analyser et aussi à rédiger d'une manière scientifique.

Je remercie Monsieur **Asroun Aïssa**, Professeur à l'Université l'Université Djillali Liabes à Sidi Bel Abbes, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de Soutenance.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **Ghernouti Youssef**, Professeur à l'Université M'hamed Bougara à Boumerdes et Monsieur **Bouziyani Tayeb**, Maître de conférences, classe A, à l'Université Amar Telidji à Laghouat, pour avoir trouvé le temps nécessaire pour rapporter ce travail.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur **Berrahou Kouider Halim**, Professeur à l'Université Djillali Liabes à Sidi Bel Abbes, pour avoir accepté d'examiner ce travail et faire partie du jury.

Je remercie Monsieur **José Barroso De Aguiar**, professeur à l'université de Minho au Portugal pour son aide scientifique précieuse.

Je voudrais également citer et remercier d'une façon très particulière mon mari Hamid qui m'a soutenu durant ces années de recherche, d'avoir supporté mes occupations et mes angoisses.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mes parents.

Je remercie Mr Djaadouni Hichem, Mme Bouchentouf et Mme Ababou pour leur aide précieuse.

Un grand merci à Madame **Alaoui**, Maître assistant, classe A, à l'Université Djillali Liabes à Sidi Bel Abbes, pour sa gentillesse et pour le temps qu'elle m'a accordé pour m'écouter dans un moment que je n'oublierais jamais.

Je remercie chaleureusement ma famille, ma belle famille, mes amis et mes collègues pour leur encouragement tout au long de ce travail.

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire :

A mes parents, à qui je souhaite une longue vie

*A mon **marie** Hamid qui m'a soutenu énormément*

*A mes **enfants** : Adem Reda, Souha Rodhab, Taha El Bachir, Ghizlène Nour,*

*A mes **très chers neveux** : Nouha Yasmine, Ibrahime El Khalil, Karwar Nourhane,*

Asmaa Sofia, Marwa Kenza , Mohamed Yassine, Lina Aridj, Imène Sara et Bachir Abdelnour

*A mes **Sœurs** : Fadéla, Fatima Zohra, Nawel, Nadia et mon frère Ahmed*

A mes beaux parents, ma belle sœur Nadia et mes beaux frères : Houcine , Samir, Arbi et Mokhtar

A tous ceux qui me connaissent

Sommaire

REMERCIEMENT	
DEDICACES	
SOMMAIRES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES NORMES	
RESUME	
INTRODUCTION GENERALE	
1. Introduction	01
2. Importance et objectif de la recherche	02
3. Aperçu sur la recherche	02
CHAPITRE 01 : REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES COMPOSITES CIMENTAIRES CAOUTCHOUTES	
1.1. Introduction	04
1.2. Les granulats légers	04
1.3. Propriétés physiques des bétons à granulats légers	06
1.3.1. Masse volumique	06
1.3.2. Maniabilité et murissement	07
1.4. Comportement mécanique des bétons légers	07
1.5. Propriétés élastiques des bétons légers	09
1.6. Propriétés thermique des bétons à granulats légers	10
1.7. Propriétés acoustique des bétons à granulats légers	11
1.8. Durabilité des bétons légers	12
1.8.1. Phénomène de cure	12
1.8.2. L'interface pate/granat	13
1.9. Utilisation des pneus usés dans le génie civil	15
1.9.1. Domaine d'utilisation du déchet pneumatique dans le génie civil	17
1.9.1.1. Le caoutchouc recyclé dans la géotechnique routière	17
1.9.1.2. Application des pneus usés dans le sol	18
1.9.1.3. Le caoutchouc recyclé dans l'industrie des composites cimentaires	20
1.10. Durabilité de l'ensemble béton/matériau recyclé	21

Sommaire

1.11.	Propriétés des composites cimentaires caoutchoutés	21
1.11.1.	Propriétés des bétons caoutchoutés à l'état frais	21
1.11.1.1.	Ouvrabilité	22
1.11.1.2.	Masse volumique	23
1.11.1.3.	Teneur en air occlus	24
1.11.2.	Propriétés des bétons caoutchoutés à l'état durcis	25
1.11.3.	Propriétés thermiques des bétons caoutchoutés	29
1.11.4.	Propriétés acoustiques des bétons caoutchoutés	31
1.11.5.	Durabilité des composites cimentaires caoutchoutés	32
1.11.5.1.	Durabilité de l'interface béton/granulats de caoutchouc	32
1.11.5.2.	Résistance au feu	33
1.11.5.3.	Résistance au gel-dégel	34
1.11.5.4.	Résistance au environnement agressifs	35
1.11.5.5.	Résistance à l'abrasion	36
1.11.5.6.	Résistance à la carbonatation	37
1.11.5.7.	Résistance à la corrosion	37
1.11.5.8.	Résistance à la pénétration des chlorures	37
1.12.	Conclusion	39
CHAPITRE 02 : EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES MATERIAUX		
2.1	Introduction	40
2.2.	Qu'est ce qu'une évaluation d'impact environnemental	40
2.3.	Evaluation de l'impact du cycle de vie	41
2.3.1.	Définition du cycle de vie	41
2.3.2.	Analyse du cycle de vie	42
2.3.3.	Principes d'une analyse de cycle de vie	42
2.3.4.	Unité fonctionnelle	43
2.3.5.	Les limites de l'analyse du cycle de vie	43
2.3.6.	Inventaire du cycle de vie	43
2.4.	Indicateurs D'impacts environnementaux	44
2.4.1.	Critères d'évaluation des indicateurs d'impact environnemental	44
2.4.2.	Les principaux indicateurs de l'évaluation d'impact environnemental	45
2.4.2.1.	Effet de serre	45

Sommaire

2.4.2.2. Acidification atmosphérique potentielle	47
2.4.2.3. Eutrophisation	48
2.4.2.4. Matières particulaires, critère d'air mobile	48
2.4.2.5. Formation d'ozone photochimique	49
2.4.2.6. Destruction de la couche d'ozone	49
2.4.2.7. Consommation d'énergie	50
2.4.2.8. Impact des déchets solides éliminés	50
2.5. Impact des matériaux de construction sur l'environnement	50
2.5.1. Cycle de vie du béton	52
2.5.2. Evaluation environnementale des matériaux innovants	54
2.6. Outils d'évaluation environnementale	55
2.7. Conclusion	55

CHAPITRE 03 : COMPAGNE EXPERIMENTALE: BETONS LEGERS CAOUTCHOUTES

3.1. Introduction	57
3.2 Matériaux utilisés	57
3.2.1. Le ciment	57
3.2.2. Les granulats	57
3.2.2.1. Graviers	58
3.2.2.2. Sable naturel	58
3.2.2.3. Granulats et poudrette de caoutchouc	58
3.2.3. L'eau	59
3.3. Identification des matériaux utilisés	59
3.3.1. Essais et procédures	59
3.3.1.1. Analyse granulométrique	59
3.3.1.2. Equivalent de sable	60
3.3.1.3. Module de finesse	61
3.3.1.4. Masse volumique	61
3.3.1.5. Absorption d'eau	62
3.3.1.6. Résistance des granulats à la fragmentation	63
3.4. Compositions des bétons légers	63
3.5. Caractérisation des bétons légers à l'état frais	65
3.5.1. Mesure de l'ouvrabilité	65

Sommaire

3.5.2. Mesure de la teneur en air occlus	66
3.5.3. Mesure de la masse volumique humide	66
3.5.4. Mesure du saignement et de la ségrégation des bétons légers	66
3.5.5. Mesure de la compactibilité	69
3.6. Caractérisation mécanique des bétons légers à l'état durcis	70
3.6.1. Mesure de la masse sèche	71
3.6.2. Mesure de la résistance à la compression	71
3.6.3. Mesure de la résistance à la traction par flexion	71
3.6.4. Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonores	72
3.7. Résultats et discussions	75
3.7.1. Propriétés des bétons légers à l'état frais	75
3.7.1.1. Ouvrabilité des bétons légers frais	75
3.7.1.2. Ségrégation et saignement des bétons légers	76
3.7.1.3. Teneur des bétons légers en air occlus	78
3.7.1.4. Masse volumique humide des bétons légers	79
3.7.1.5. Degré de compactibilité des bétons légers	80
3.7.2. Propriétés des bétons légers durcis	81
3.7.2.1. Masse volumique sèche des bétons légers durcis	81
3.7.2.2. Résistance à la compression des bétons légers	83
3.7.2.3. Résistance à la traction	84
3.7.2.4. Vitesse d'impulsion ultrasonore dans les bétons légers caoutchoutés	85
3.8. Conclusion	88
CHAPITRE 04 : EFFETS DES GRANULATS DE CAOUTCHOUC SUR LA DURABILITE DES BETONS LEGERS	
4.1. Introduction	90
4.2. Présentation des spécimens de l'étude	90
4.3. Résistance au gel-dégel	90
4.3.1. Effets du cycle de gel-dégel sur la matrice cimentaire	92
4.3.2. Mesure de la résistance au gel-dégel	93
4.3.3. Essai gel-dégel	93
4.3.4. Résultats et interprétations	95
4.4. Les attaques des acides des bétons	99
4.4.1. Attaque des bétons par sulfate de sodium (Na_2SO_4)	100

Sommaire

4.4.1.1. Les essais existants	101
4.4.1.2. Mesure de la résistance à l'attaque par les sulfates	103
4.4.1.3. Résultats et interprétations	104
4.4.1.4. Mesure du pH des solutions acides de sulfate de sodium	108
4.4.2. Attaque par acide chlorhydrique au béton léger caoutchouté	111
4.4.2.1. Résultats et interprétations	112
4.4.2.2. Couche atteinte par l'acide chlorhydrique	116
4.4.2.3. Evolution du pH de la solution acide chlorhydrique	117
4.5. Emission acoustique	119
4.5.1. Facteurs influençant la vitesse d'impulsion ultrasonore	119
4.5.2. Facteurs influençant l'élasticité du béton	120
4.5.3. Essai d'évaluation de l'émission acoustique	121
4.5.4. Résultats et interprétations	121
4.6. Résistance au feu	124
4.6.1. Effets des hautes températures sur la microstructure du béton	125
4.6.2. Evolution de la porosité et la perméabilité	125
4.6.3. Perte de masse	125
4.6.4. Essai au feu	126
4.6.4.1. Tenue du caoutchouc au feu	127
4.6.4.2. Dispositif de mesure	128
4.6.4.3. Déroulement des mesures	128
4.6.4.4. Résultats et interprétations	129
4.7. Absorption d'eau	136
4.7.1. Essai d'absorption de l'eau	137
4.7.2. Interprétations des résultats	138
4.8. Conclusion	140
CHAPITRE 05: IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU BETON INCORPORANT DES GRANULATS DE CAOUTCHOUC	
5.1. Introduction	142
5.2. ATHENA estimateur d'impact	143
5.3. Objectifs de l'étude	147
5.4. Normalisation de l'impact environnemental	147
5.4.1. Unité fonctionnelle de l'étude	148

Sommaire

5.4.2. Inventaire de l'étude	148
5.4.3. Evaluation de l'impact environnemental	150
5.4.4. Résultats et interprétations	151
5.5. Conclusion	158

CONCLUSIONS GENERALES, PERSPECTIVES , RECOMMANDATIONS.

1. Conclusions générales	161
2. Perspectives	166
3. Recommandations	167

REFERENCES

ANNEXES

Liste des figures

Figure 1.1	Interface pate-granulats et mécanismes d'interaction	06
Figure 1.2	Résistance en compression (a) et module élastique (b) en fonction de la masse volumique du béton durci, résultats à 28 jours.	08
Figure 1.3	Relation contrainte-déformation des bétons de granulats légers soumis à un effort de compression uni-axial.	09
Figure 1.4	Evolution des modules d'Young de bétons légers en fonction de leur résistance à compression.	10
Figure 1.5	(a) Transfert des efforts dans le Modèle pate granulats, (b) Transfert des efforts dans le Modèle pate granulats très déformable.	14
Figure 1.6	Évolution du pourcentage de porosité en fonction de la distance à la surface de granulat.	15
Figure 1.7	Pose des nappes de pneus projet pilote route de Bousmail.	19
Figure 1.8	Ouvrage de Mostaganem RN11 (Algérie).	19
Figure 1.9	Béton à base de granulats de caoutchouc.	20
Figure 1.10	Influence de granulats en caoutchouc sur l'affaissement (a) et (b).	22
Figure 1.11	Variation de la masse volumique du béton incorporant des granulats de caoutchouc (a) et (b).	24
Figure 1.12	Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus.	25
Figure 1.13	Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des granulats de caoutchouc.	28
Figure 1.14	Perméabilité à l'eau de béton contenant en fonction du taux de remplacement par des granulats de caoutchouc.	29
Figure 1.15	Absorption d'eau des bétons en fonction du taux de remplacement par des granulats de caoutchouc.	29
Figure 1.16	Influence du dosage en granulats de caoutchouc sur la conductivité thermique	30
Figure 2.1	Cycle de vie du béton.	42
Figure 2.2	Historique et futur des concentrations du CO ₂ dans l'atmosphère.	45
Figure 2.3	Dépenses énergétiques pour la production des différents types.	52
Figure 2.4	Cycle de vie du béton.	53
Figure 3.1	(A) Poudrette de caoutchouc, (B) granulats de caoutchouc [Med16]	59
Figure 3.2	Analyse granulométrique des granulats ordinaires et artificiels.	60
Figure 3.3	Schéma d'échantillon de 3000 ml d'un béton de référence et un béton léger caoutchouté.	67
Figure 3.4	Gravité des graviers et des granulats de caoutchouc [Med16]	69
Figure 3.5	Structures granulaires et formulation des bétons durcis [Lar99]	70
Figure 3.6	Eprouvettes prismatique soumises aux essais de traction par flexion en 04 points à 28 jours.	72
Figure 3.7	Essai ultrasonique sur éprouvettes de béton léger caoutchouté.	73

Figure 3.8	Différents chemins de passage d'une onde sonore dans un matériau	73
Figure 3.9	Affaissement des bétons légers en fonction du taux de substitution.	76
Figure 3.10	Paramètres de saignement et de ségrégation des bétons légers testés.	77
Figure 3.11	Variation de la teneur en air occlus en fonction du taux de substitution.	78
Figure 3.12	Variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du taux de substitution.	80
Figure 3.13	Compactibilité des bétons légers.	81
Figure 3.14	Variation de la masse volumique en fonction de l'âge des bétons légers.	82
Figure 3.15	Variation de la masse volumique en fonction de l'âge des bétons légers	83
Figure 3.16	Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution.	84
Figure 3.17	Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de substitution.	85
Figure 3.18	Variation de la vitesse de propagation du son à 28 jours.	86
Figure 3.19	Temps de passage des ondes ultrasonores dans les bétons légers âgés de 28 jours.	87
Figure 3.20	Evolution du module d'élasticité des bétons légers à 28 jours.	88
Figure 4.1	Abaissement de la température de fusion de la glace (eau pure) avec la diminution du rayon des pores.	92
Figure 4.2	Etat des éprouvettes après exposition à 35 cycles de gel-dégel	96
Figure 4.3	Pertes de masse des bétons légers dues au gel-dégel jusqu'au 50 ^{ème} cycle.	97
Figure 4.4	Perte de masse des bétons légers due au gel-dégel du 60 ^{ème} au 100 ^{ème} cycle.	97
Figure 4.5	Etat des éprouvettes après 100 cycles de gel-dégel.	98
Figure 4.6	Influence de la nature et de la concentration des solutions d'acides sur les résistances mécaniques des mortiers	100
Figure 4.7	Evolution des pertes de masse jusqu'aux 30 cycles dues à l'attaque par Na ₂ SO ₄	104
Figure 4.8	Evolution des pertes de masse jusqu'aux 60 cycles dues à l'attaque par Na ₂ SO ₄	105
Figure 4.9	Evolution des pertes de masses jusqu'aux 90 cycles dues à l'attaque par Na ₂ SO ₄	106
Figure 4.10	Eprouvettes après 60 cycles d'immersion dans une solution de Na ₂ SO ₄	107
Figure 4.11	Etat des éprouvettes après 90 cycles d'immersion dans une solution de 5% d'acide de Na ₂ SO ₄ .	108
Figure 4.12	Solution de l'acide Na ₂ SO ₄ contenant des éprouvettes pour mesure du pH	109
Figure 4.13	Éprouvettes immergées dans la solution de l'acide chlorhydrique (HCl) concentrée à 5%	112
Figure 4.14	Evolution des pertes de masse jusqu'aux 30 cycles d'attaque de HCl.	113
Figure 4.15	Evolution des pertes de masse jusqu'aux 55 cycles d'attaque de HCl.	114
Figure 4.16	Evolution des pertes de masse jusqu'aux 90 cycles d'attaque de HCl.	114
Figure 4.17	Eprouvettes de bétons légers caoutchoutés et de référence, après 90 cycles d'immersion dans une solution de 5% d'acide HCl.	115

Figure 4.18	Le suivi de l'évolution du pH de la solution de 5% d'acide chlorhydrique (image correspondant à 85 cycles).	117
Figure 4.19	Classification des facteurs affectant le module d'élasticité.	120
Figure 4.20	Variation de la vitesse du son dans des éprouvettes âgées de cinq (05) ans	122
Figure 4.21	Variation du temps de passage de l'onde sonore dans les éprouvettes âgées de cinq (05) ans.	123
Figure 4.22	Evolution du module d'élasticité des bétons légers âgés de cinq (05) ans.	123
Figure 4.23	Evolution de la perte de masse avec la température.	126
Figure 4.24	Granulats de caoutchouc avant et après leurs mises au four à 40, 60, 100, 200 et 300 C°.	127
Figure 4.25	Changement massique des granulats de caoutchouc après chauffage.	128
Figure 4.26	Eprouvettes de bétons légers caoutchoutés et de référence avant leurs mises au feu.	129
Figure 4.27	Evolution des pertes de masse au feu des bétons légers testés.	130
Figure 4.28	Eprouvette de bétons légers caoutchoutés et béton léger de référence chauffés à 200°C.	131
Figure 4.29	Eprouvettes de bétons légers caoutchoutés et béton léger de référence chauffés à 400°C.	132
Figure 4.30	Eprouvette de bétons légers caoutchoutés et béton léger de référence chauffés à 600°C	133
Figure 4.31	Eprouvette de bétons légers caoutchoutés et béton léger de référence chauffés à 800°C	134
Figure 4.32	Eprouvettes de bétons légers caoutchoutés et béton léger de référence chauffés à 1000°C.	135
Figure 4.33	Des éprouvettes de bétons légers immergées dans l'eau.	137
Figure 4.34	Absorption d'eau des bétons légers étudiés.	138
Figure 5.1	Processus d'estimation d'impact par ATHENA.	145
Figure 5.2	Les données entrantes et sortantes de ATHENA.	146
Figure 5.3	Cycle de vie des bétons légers analysés	148
Figure 5.4	Contribution des bétons légers analysés au changement climatique.	151
Figure 5.5	Contribution des bétons légers analysés à l'acidification atmosphérique.	152
Figure 5.6	Contribution des bétons légers analysés à génération des matières particulaires.	153
Figure 5.7	Contribution des bétons légers analysés à l'eutrophisation	154
Figure 5.8	Contribution des bétons légers analysés à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique.	155
Figure 5.9	Contribution des bétons légers analysés à la formation d'ozone photochimique.	156
Figure 5.10	Contribution des bétons légers analysés à la consommation de l'énergie primaire totale.	156
Figure 5.11	Contribution des bétons légers analysés à la consommation des combustibles fossiles.	157
Figure 5.12	La demande d'énergie cumulée par les bétons légers analysés	158

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Affaissement des bétons incorporant des granulats de caoutchouc	23
Tableau 2.1	Historique et futur des concentrations du CO ₂ dans l'atmosphère.	46
Tableau 2.2	Acidification potentiel de quelques substances.	47
Tableau 3.1	Constituants du ciment	57
Tableau 3.2	Equivalent du sable des granulats ordinaires	60
Tableau 3.3	Masse volumiques apparentes et absolues des granulats.	61
Tableau 3.4	Masse volumique des granulats du caoutchouc.	62
Tableau 3.5	Coefficients d'absorption (Ab) des granulats ordinaires et artificiels.	63
Tableau 3.6	Essai Los-Angeles des granulats ordinaires.	63
Tableau 3.7	Composition de 1 m ³ des bétons léger de l'étude.	64
Tableau 3.8	Expressions de la limite d'écoulement.	68
Tableau 3.9	Classes de compactage en fonction du degré de compactibilité.	70
Tableau 3.10	Qualité du béton selon la vitesse des ondes ultrasonores.	74
Tableau 4.1	Evolution du pH des solutions d'acide de sulfate de sodium en fonction du temps d'immersion.	110
Tableau 4.2	Changement dimensionnel des bétons légers attaqués par l'acide chlorhydrique HCl.	116
Tableau 4.3	Evolution du pH de la solution d'acide chlorhydrique de 5% durant l'immersion des éprouvettes testées.	118
Tableau 5.1	Série d'impacts produits par le recyclage des pneus usagés.	149

Liste des Normes

NF P 18-553	Préparation d'un échantillon pour essai.
NF P 18-560	Analyse granulométrique par tamisage.
NF P 18-597	Essai équivalent de sable.
NF P 18-540	Module de finesse
NF P 18-554	Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux
NF P 18-555	Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables
NF P 18-573	Essai Los Angeles
NF P 18-430	Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules
NF P 18-437	Prélèvement du béton frais
NF P 18-451	Essai d'affaissement au cône d'Abrams
NF P 18-443	Teneur en air — Méthode de la compressibilité
NF P 18-440	Masse volumique humide
NF P 18-431	Essai de mesure de la compactibilité
NF P 18-438	Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance
NF P 18-435	Masse volumique sèche
NF P 18-455	Résistance à la compression
NF P 18-407	Essai de traction par flexion
ASTM C666/ C666M	Essai de mesure de la résistance aux cycles rapides de gel-dégel (Livre annuel des Normes ASTM,(1992). American Society for Testing and Materials, Vol. 04-02, Philadelphia, PP. 347-352).
ASTM C330-04	Essai gel-dégel pour des bétons à granulats légers
ASTM C 642-97	Essai de mesure de la densité et l'absorption et les pores dans les bétons durcis. West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
ASTM C 597	Essai d'évaluation de l'émission acoustique par mesure de la vitesse du son (Décembre 2002).
ASTM E2032-09	Essai de mesure de la résistance au feu (2000).
ASTM C267-01	Essai de mesure de la résistance des bétons de mortiers, de coulis et de revêtements monolithiques et de bétons polymères à l'attaque chimique (livre annuel des Normes ASTM, Vol. 03-01).
EN ISO 14040-41-42-43	Évaluation du cycle de vie (2006). Environmental management, Principes et cadre, BSI, Londres.
EN ISO 14044	Évaluation du cycle de vie (2006). Environmental management, Exigences et conseils, BSI, Londres.

Résumé :

Les pneus usagés sont des déchets abondants et préoccupants. L'incorporation de granulats issus du broyage de ces déchets est une voie de valorisation ainsi qu'une contribution à la protection de l'environnement. Le but de ce travail de thèse était d'étudier expérimentalement des bétons confectionnés par substitution partielle des graviers ou sable par des agrégats fins ou grossiers en caoutchouc. Une identification des matériaux utilisés est d'abord présentée, ensuite une campagne expérimentale sur des formulations de bétons incorporant des granulats de caoutchouc des pneus usés, à l'état frais puis à l'état durcis, est entreprise. La durabilité de ces bétons est aussi examinée. Les résultats montrent que les bétons confectionnés par des granulats de caoutchouc des pneus usés sont des bétons légers et ductiles idéales pour les applications à grande surface comme les chaussées et dallages sur terre-plein ; aussi les indicateurs de durabilité de ce type de matériau semblent compatibles avec le milieu environnant et la durée de service des applications citées. Enfin l'évaluation de l'impact environnemental de ces bétons comparés à des bétons ordinaires, utilisant le logiciel *Athena Impact Estimator* est présentée ; la réduction de l'émission CO₂ de tels bétons est notable.

Mots clés : *Béton léger, Granulats de caoutchouc, Expérimentation, Durabilité, Emission CO₂.*

Summary :

Used tires are abundant and a worrying waste. The incorporation of aggregates of waste tire is a recovery method and a contribution to environmental protection. The aim of this thesis was to study experimentally the concretes made with partial replacement of gravel or sand with fine or coarse rubber aggregates. Identification of materials is first presented, then an experimental companion on different concrete formulations incorporating rubber granules from used tires in fresh and hardened states is done. The durability of these concretes is also examined. The results show that concretes incorporating scrap tire rubber granulates are lightweight and ductile concretes ideal for uses in large area applications such as roads and pavements on-ground. Sustainability indicators of this type of material seem compatible with the surrounding environment and the service life of the mentioned applications. Finally, using *Athena Impact Estimator software*, the evaluation of the environmental impact of these concrete compared to ordinary one, is presented. The reduction of CO₂ emission of such concretes is notable.

Keywords: *Lightweight concrete, Rubber Aggregates, Experimentation, Sustainability, CO₂ emission.*

ملخص :

الإطارات المستعملة نفايات وفيرة ومقلقة. إدراج المجاميع من طحن هذه النفايات هي طريقة للرسكلة والمساهمة في حماية البيئة. الهدف من هذه الرسالة هو دراسة تجريبية للخرسانة المصنوعة من استبدال جزئي للحصى أو الرمال بالركام الناعم أو الخشن للمطاط. بعد تحديد خصائص المواد، تمت الدراسة التجريبية لصياغات محددة تدمج حبيبات المطاط من الإطارات المستعملة، في الحالة الطازجة و الصلبة. كما تم النظر في ديمومة هذه الخرسانة. أظهرت النتائج أن الخرسانة المكونة من حبيبات مطاط الإطارات خفيفة الوزن ومطيلة مما يجعلها خرسانة مثالية لتطبيقات في المساحات الكبيرة مثل الطرق والأرصفت. كما إن مؤشرات الاستدامة لهذا النوع من المواد تبدو متوافقة مع البيئة المحيطة بها، ومدة الخدمة للتطبيقات المذكورة. وأخيرا تم تقديم تقييم الأثر البيئي لهذه الخرسانة مقارنة مع خرسانة عادية، وذلك باستخدام برمجيات *Athena Impact Estimator*. أظهرت النتائج انخفاضا ملحوظا لانبعاث ثاني أكسيد الكربون CO₂ بالنسبة لهذا النوع من الخرسانة.

الكلمات المفتاحية: *الخرسانة خفيفة الوزن، المطاط، التجارب، الديمومة، انبعاث CO₂.*

INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction

Depuis des décennies, l'homme s'est préoccupé de l'exploitation de moyens permettant d'améliorer sa vie et sa protection. Sa préoccupation majeure a été la construction, cette dernière était plus pertinente et plus durable avec l'emploi des composites cimentaires. Cependant, la matière première, devient de plus en plus moins abondante, puisque sa consommation ne cesse depuis ce temps de s'accroître.

D'autre part, et au fil du temps, l'accumulation des déchets, non dégradables, tels que les pneus usés, devenant de plus en plus incontrôlable et occupant un espace public, non négligeable, a mis en lumière l'utilisation de ces matériaux dans plusieurs usages, à savoir, des applications dans le domaine de la construction, permettant à la fois, de préserver les ressources naturelles des granulats et d'améliorer les performances et la durabilité des composites cimentaires, sans oublier la protection de l'environnement.

En fait, le caoutchouc est une solution parfaite pour les problèmes de l'environnement. Selon leurs formulations, les pneus sont classés parmi les déchets non dangereux et non dégradables (400 ans environ), mais en raison du risque d'incendies non maîtrisables dans les décharges à cause des fumées toxiques dégagées, la stagnation des eaux dans ces endroits, ainsi que les insectes, leur valorisation semble être une obligation plus qu'un choix.

Le parc automobile en Algérie est en augmentation remarquable, liée à l'explosion démographique et à l'urbanisation incontrôlée. Avec le principe de chaque pneu acheté, génère un pneu jeté. On se retrouve avec un volume de déchets qui nous oblige à procéder à sa valorisation, surtout autant que granulats. Ce procédé a prouvé son efficacité dans la consommation de ces matériaux abandonnés dans la nature, selon les rapports des recherches faites à ce sujet. Les granulats de caoutchouc issus des pneus usés, ont été employés seuls ou combinés avec d'autres matériaux, afin d'associer les propriétés, les unes aux autres et d'éliminer tout risque d'incompatibilité technique avec les autres constituants de ces composites. Le choix des matériaux, est d'une importance primordiale vis-à-vis gain d'autres caractéristiques, assurant un impact positif sur l'environnement et l'économie allant de leur production, leur transport et de leur utilisation.

Les études démontrant la faisabilité de cette alternative, sont délicates, en raison de la variété des granulats de caoutchouc qu'on peut avoir et aux choix illimités de leur nature, de tailles et de procédés dont ils sont obtenus, qui sont généralement basés sur la fragmentation. Le besoin de composites cimentaires, ayant des capacités de déformations élevées, avec une meilleure résistance à la traction et une faible sensibilité aux fissurations, en particulier dans les applications des grandes surfaces, tels que les dallages et les chaussées, en plus de la durabilité dans les différents emplois possibles, pour lesquels ces composites sont conçus, comme les milieux remarquablement agressifs ou bien ceux de basses température, etc..., a toujours été l'objectif de ces études.

Suite à l'industrialisation des différents secteurs d'économie, mettant l'avenir environnemental en jeu, il a été convenu, que le monde entier pense à mettre des plans de prévention pour minimiser la consommation des ressources naturelles et de l'énergie. Actuellement, diverses méthodes sont permises, afin de mettre le point sur les limites, qu'il ne faut pas dépasser, afin de s'assurer que le béton reste sain, dans environnement sain, l'idée de base de cette étude.

Le travail présenté, dans le cadre de cette recherche a débuté en 2011, il porte sur l'étude des propriétés pouvant être assurées par des bétons légers incorporant des volumes de 5%, 7,5% et 10% de granulats et de poudrette de caoutchouc, remplaçant partiellement les mêmes volumes des granulats naturels. Les compositions étudiées dans ce travail, sont prévues pour la réalisation non structurelle telle que les grandes surfaces. La première partie, consiste en une caractérisation de ces matériaux à l'état frais et durcis. L'évaluation de l'impact de l'environnement sur l'ensemble des mélanges étudiés, à travers plusieurs essais expérimentaux stimulant les effets de certaines agressivités environnementales particulières, a été aussi abordée. Dans la deuxième partie de cette étude, l'estimation de l'impact de ces mélanges sur l'environnement, est également évaluée. Ceci, permet de mieux cerner les différents intervenants pouvant influencer l'utilisation de ces granulats

2. Importance de la recherche

En Algérie, le gouvernement a mis en œuvre plusieurs plans de gestion des déchets afin de les contrôler. Mais, les déchets solides tels que les pneus usés sont un vrai problème dont les décharges et les centres d'enfouissement ne peuvent être une solution pour leur gestion. Dans ce pays, la tentative de concrétisation de l'emploi de ces granulats, en remplacement des granulats naturels, est un vrai défi, vu que le béton est largement employé, alors que les gisements des matières premières, sont en épuisement progressif et l'impacte négatif de leur extraction, est considérablement élevé. En réalité, cette thèse est une tentative pour inciter le constructeur Algérien à produire et à utiliser ces granulats, afin de préserver l'environnement et de réduire le besoin aux granulats naturels, car l'investissement dans tous les domaines, à savoir, l'industrie du recyclage, est tributaire des garanties et les arguments avancés par les chercheurs.

Les granulats recyclés provenant des pneus usés, sont de plusieurs natures et peuvent combler, par leur emploi, plusieurs lacunes dans les composites cimentaires classiques, en particulier, la légèreté et la durabilité. Ces propriétés, ont été largement étudiées par plusieurs chercheurs dans le monde entier (Turatsine, Benaazouk A., Sandra B., Gross M., Savas, Khaloo, Cuong, etc.....). La totalité des ces chercheurs, ont prouvé que les performances de ces composites sont fortement influencées par la nature de ces granulats.

Considérant ce qui précède, le présent travail de recherche, vise à cerner l'influence de l'ajout des granulats de caoutchouc sur les bétons légers réalisés avec des matériaux locaux, afin d'élargir le domaine de leur usage dans des applications jugées correspondantes, suivant leurs nouvelles propriétés acquises et justifiées par les résultats obtenus. Donc, ce travail s'articule autour de trois objectifs principaux:

Evaluer les performances et la durabilité des bétons légers contenant de faibles teneurs en caoutchouc.

Evaluer l'impacte de ces bétons légers caoutchoutés sur l'environnement.

Enquêter sur les propriétés globales des composites cimentaires caoutchoutés.

Relier les résultats de la présente recherche à ceux de la littérature.

3. Aperçu sur la recherche

Cette thèse constitue une démarche dans l'évaluation des propriétés des bétons légers caoutchoutés contenant des granulats de caoutchouc, elle est structurée en cinq chapitres:

Une introduction générale, dont on a mis à la lumière l'importance et l'objectif de la recherche, ainsi que son organisation.

Le premier chapitre, débute par une synthèse sur les propriétés principales bétons légers classiques. Une autre partie de ce chapitre, interprète la diversité enregistrée dans les résultats existants dans la littérature, relative aux bétons légers caoutchoutés.

Le deuxième chapitre, aborde une synthèse bibliographique relative à l'évaluation environnementale en général.

Le troisième chapitre, décrit la campagne expérimentale réalisée en 2011, sur les bétons légers caoutchoutés au jeune âge. Cette partie, est entièrement réalisée au laboratoire (LMDC), de l'université de Djillali Liabés à Sidi Bel Abbès. Les matériaux, les compositions des bétons légers étudiés et les essais de caractérisation sont discutés.

Le quatrième chapitre, aborde une deuxième campagne expérimentale, réalisée sur les mêmes composites âgés de 05 ans, caractérisant les mécanismes de dégradations atteignant ces composites dans de différentes conditions environnementales (attaques chimique par acide chlorhydrique et sulfates de sodium, haute et basse température, absorption d'eau), ainsi qu'un test ultrasonore, afin de vérifier la durabilité de leurs propriétés acoustiques. Les résultats sont analysés et comparés à ceux tirés de la littérature.

Le cinquième chapitre, comporte les résultats d'une évaluation de l'impact environnemental du cycle de vie des bétons légers caoutchoutés étudiés, une simulation est effectuée, en utilisant le Logiciel ATHENA.

La conclusion générale, récapitule les différents résultats obtenus, suivie par un jugement concernant la faisabilité de l'utilisation du caoutchouc dans les bétons légers. Les recommandations et les perspectives tracées pour l'avenir de cette étude sont proposées et discutées.

Chapitre 01

Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

1.1. Introduction

Grâce à leurs propriétés mécaniques et aux faibles coûts de fabrication par rapport à d'autres matériaux de construction, les composites cimentaires sont les plus utilisés dans le domaine du génie civil. Dans plusieurs domaines; la chimie, la physique et la mécanique, l'étude des phénomènes qui ont eu lieu dans les matériaux cimentaires, ont soulevé une multitude de questions et ont généré plusieurs controverses.

C'est dans la nécessité d'alléger les structures que les bétons légers ont apparu, ils sont généralement obtenus par introduction d'air selon trois façons. Le béton cellulaire, est obtenu lorsque l'air est incorporé dans la pâte de ciment, lorsque l'air vient remplacer les granulats fins entre les gros granulats ; le béton est qualifié de béton sans fines ou béton caverneux, et enfin, lorsque les granulats sont eux-mêmes allégés, le béton est alors qualifié de béton à granulats légers. C'est dans cette dernière catégorie, que ce travail de recherche se situe.

Les bétons légers, d'une masse volumique de 1200 à 2000 kg/m³, peuvent avoir une résistance comparable aux bétons de granulats rigides, tout en ayant une densité plus faible. L'avantage d'un béton léger, est que la masse d'un élément fabriqué en béton léger peut être réduite jusqu'à 30 % en comparaison avec ce même élément fabriqué avec un béton usuel [Tho13]. Une telle densité peut être obtenue grâce à la substitution des granulats classiques fins ou grossiers par des granulats plus légers, souvent recyclés. Ces bétons permettent une plus grande souplesse quant à la conception des ouvrages.

En plus des granulats légers naturels, plusieurs types de granulats légers sont fabriqués, dont le but est d'améliorer leurs propriétés physiques, et par conséquent, une meilleure qualité. La grande variété des granulats légers et les nombreuses possibilités de formulation, font donc de chaque béton léger, un béton avec des propriétés spécifiques. Ainsi, l'utilisation du béton léger, nécessite une étude des mélanges possibles afin de satisfaire les différentes exigences quant aux propriétés mécaniques et de durabilité.

Le béton léger est utilisé essentiellement en rénovation des dalles de plancher, son emploi à la construction de planchers légers et institutionnels, a facilité la construction de bâtiments plus hauts et des ponts de plus longue portée. La présence des granulats légers dans sa composition, lui offre des avantages supplémentaires ; ils confèrent des propriétés d'isolation thermique et acoustique, la résistance au feu, une bonne résistance aux cycles de gel et de dégel et une faible capacité d'absorption d'eau.

1.2. Les granulats légers

Les tous premiers granulats légers utilisés pour la réalisation de béton, ont été des granulats naturels, issus de roches volcaniques, comme la pierre ponce caractérisées par sa faible densité. Puis, des granulats légers artificiels, à base de granulats naturels, fabriqués dès 1917 aux États-Unis à partir de matières premières naturelles (argile, schiste, ardoise) ou bien de sous-produits industriels, ils ont des caractéristiques de résistance et d'isolation intéressantes, tels que les laitiers expansés et les cendres volantes frittées [Yan08].

Ces granulats ont une structure poreuse, ce qui explique leur légèreté (masse volumique entre 400 et 800 kg/m³ selon le type de granularité), leur utilisation dans le béton, a pour but de diminuer de façon

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

plus au moins importante, selon le granulat choisi, la masse volumique comprise entre 200 et 1200 kg/m³.

Les granulats très légers sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Ils ont une masse volumique, variable entre 20 et 100 kg/m³, ils permettent de réaliser des bétons de 300 à 600 kg/m³, ceci, constitue donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers, tels que les dalles ou les rechargements sur planchers peu résistants [Moh14].

Plusieurs sortes de granulats légers, avant leur emploi, nécessitent un traitement spécifique, dû à leurs origines organiques, réactives à la présence de certains constituants des liants hydrauliques. Ce traitement s'effectue selon trois différents procédés (physique, thermique et chimique), afin de les rendre inertes. Autres sont obtenus par expansion (argile expansée) à une température dans la plage de 1000 à 1300°C ; leur porosité est conservée par refroidissement rapide. Ce procédé, les rend plus légers et plus coûteux, selon l'expansion plus au moins poussée des granulats. Ces granulats peuvent être obtenus par le concassage des masses expansées ou par préformage avant l'expansion (moulage et déchiquetage de l'argile, pulvérisation des schistes et de l'ardoise, frittage des cendres volantes). Le moulage et le frittage permettent d'obtenir des granulats de forme sphérique (granulats roulés). Le laitier liquide à 1450°C est fabriqué sans opération de concassage ni de préformage, il est alors projeté dans l'atmosphère au moyen d'un tambour rotatif, tandis que des jets d'eau assurent l'expansion des particules en fusion [Mal89].

L'utilisation des granulats légers pour réaliser des bétons légers, s'est largement développée au monde entier en raison des avantages spécifiques, qu'ils peuvent présenter comparativement aux autres granulats, tel que le faible poids, meilleure isolation thermique et acoustique, ou encore une meilleure tenue au gel et au feu. En plus, le matériau incorporant ces granulats, est facile à mettre en œuvre. Le gain du poids, entraîne la légèreté des structures, nécessitant par conséquent, des fondations moins importantes.

Les granulats légers, sont caractérisés par une très grande porosité. La taille et la distribution des pores, influencent la résistance des granulats, mais déterminent surtout leurs propriétés d'absorption. Il a été montré, que le taux d'absorption d'eau des granulats légers artificiels, est très élevé, plus de 50% de l'absorption dès les premières minutes [Zha90]. Cette porosité est proportionnelle à la taille des grains, plus cette dernière diminue, plus leur densité apparente, augmente et moins ils sont poreux. Les cendres volantes frittées, sont les plus absorbantes comparativement à l'argile, étant donné l'interconnexion plus élevée entre les pores.

Plusieurs chercheurs ont noté que l'utilisation des granulats légers pouvait réduire le retrait endogène, diminuant ainsi le risque de fissuration. Au niveau de la durabilité, avec une cure appropriée à la nature des granulats et à leur teneur en eau, les bétons légers ne montrent pas une résistance plus faible que les bétons ordinaires. Au contraire, dans certains cas, les résistances au gel-dégel et aux sels fondants par exemple, sont améliorées [Tho13].

En plus, il y a toujours des tentatives d'exploitation de nouvelles générations de granulats légers, généralement issus de la récupération des déchets tels que les polymères, le bois, le caoutchouc, etc..., pouvant remplacer les granulats naturels.

1.3. Propriétés physiques des bétons à granulats légers

La qualité microstructurale des interfaces pâte-granulats légers, est généralement supérieure à celle des bétons de granulats rigides. Des mécanismes d'interaction physique, chimique et mécanique, ont été identifiés, sans compter l'influence du faible module élastique des granulats sur la microfissuration des interfaces (figure 1.1).

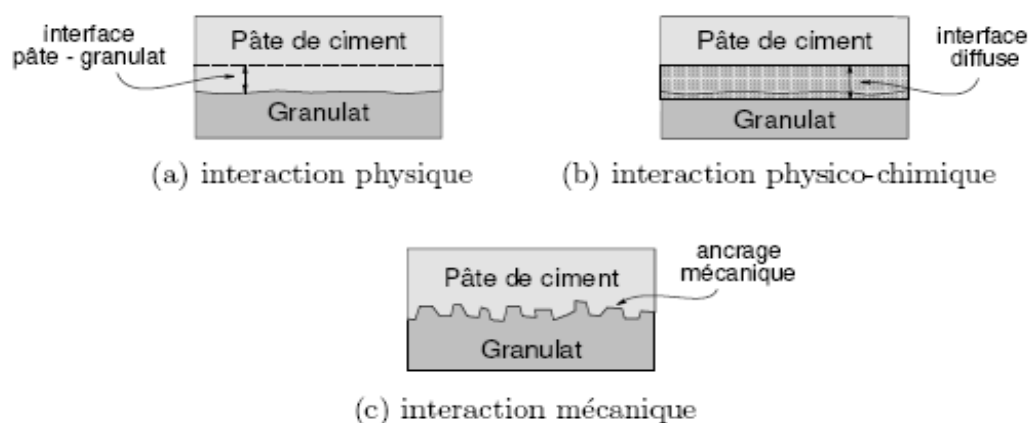


Figure 1.1 Interface pâte-granulats et mécanismes d'interaction [Zha89].

1.3.1. Masse volumique

L'expression «masse volumique», nécessite une définition particulière lorsqu'elle est employée pour un béton léger. En effet, trois masses volumiques différentes peuvent être définies: la masse volumique à l'état frais, la masse volumique à l'état séché à l'air et la masse volumique à l'état séché au four.

La masse volumique du béton fraîchement malaxé, peut facilement être déterminée comme la masse volumique à l'état frais. Cependant, au cours du séchage à l'air ambiant, l'humidité est perdue jusqu'à l'obtention d'un quasi-équilibre: le béton a alors une masse volumique à l'état séché à l'air. Si le béton est séché à 105°C, il a atteint la masse volumique à l'état séché au four. Des différences semblables se retrouvent également dans le cas des bétons ordinaires, mais les différences entre les trois masses volumiques sont plus grandes dans le cas d'un béton léger, du fait de l'importance de la quantité d'eau contenue dans le béton léger frais et de ses variations lors du durcissement et de la vie de l'ouvrage.

Ainsi, la masse volumique sèche ρ_{bs} du béton léger, est la masse volumique qu'aurait le béton léger si toute l'eau ne servant pas à l'hydratation du ciment s'évaporait. Elle peut être déduite de la masse volumique à l'état frais par la relation suivante :

$$\rho_{bs} = \rho_0 - E_{v0} \quad (1.1)$$

Où ρ_0 désigne la masse volumique réelle du béton frais et E_{v0} la quantité d'eau évaporable du béton.

Cette dernière quantité peut être caractérisée par une relation suivante :

$$E_{v0} = E + E_a - 0.25 C \quad (1.2)$$

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

Où E désigne la quantité d'eau de gâchage, E_a la quantité d'eau absorbée par les granulats légers, et C la quantité de ciment. Il a été noté, que l'écart entre la masse volumique sèche ρ_{bs} et la masse volumique du béton frais ρ_0 varie entre 150-250 kg/m³ [Nev00].

La masse volumique à l'état séché à l'étuve, peut être prise égale en première approximation à la masse volumique sèche. Plusieurs recherches montrent en effet, que quelque soit l'humidité initiale dans les granulats, la masse volumique à l'état séché à l'air est supérieur de 50 kg/m³ à la masse volumique à l'état séché à l'étuve [Osb85].

Ainsi, la prise de poids d'un béton léger immergé, ne dépasse pas 40 kg/m³ et est de 30 kg/m³ pour un béton traditionnel. Les auteurs expliquent essentiellement, ce gain de poids, expliqué par le remplissage des vides du mortier, et non par la migration d'eau vers les granulats légers, les pores de surface étant au moins en grande partie bouchés par le mortier, au moment du malaxage et en début de prise, du faite des échanges d'eau entre le mortier et les granulats légers [Vir86].

1.3.2. Maniabilité et mûrissement

Lorsqu'on fabrique un béton avec des granulats légers, une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée par les granulats. Cette absorption d'eau dépend toute fois de l'interconnexion des pores dans les granulats, du degré d'humidité des granulats et du rapport eau/ciment de la matrice cimentaire. Autres chercheurs, ont montré que l'effet du mûrissement sur l'ensemble du matériau, peut se traduire par une perte rapide de maniabilité [Fag78; Zha91; Puk96], mais peut aussi contribuer à améliorer la microstructure de la matrice cimentaire aux interfaces pate-granulats par un effet de filtration. Ainsi, l'eau absorbée par les granulats, constitue une réserve pour l'hydratation subséquente de la matrice cimentaire [Ben01; Ben99; Koh99].

En revanche dans le cas des granulats utilisés secs, l'absorption d'eau des granulats, diminue la maniabilité. De plus, si le béton est vibré avant que l'absorption par les granulats légers secs ne soit terminée, des vides dus à la dessiccation se développent et à moins que le béton ne soit revibré, sa résistance sera moins élevée [Nev00].

Certains moyens, tels que le pré-mouillage ou l'utilisation d'un traitement de surface visant à réduire l'absorption des granulats, s'avèrent très efficaces pour diminuer la perte de maniabilité des bétons légers. La paraffine et la pate de ciment, entre autres, ont été utilisés [Top95].

1.4. Comportement mécanique des bétons légers

La qualité des granulats, est considérée comme le principal facteur limitant la résistance en compression des bétons légers, ensuite la qualité de la matrice et la masse volumique de la pate durcie. La qualité du granulat léger, est directement liée à sa densité apparente, qui contrôle sa résistance et sa rigidité, au procédé de fabrication et à la matière première utilisée.

Plusieurs résultats, témoignent d'un plafond de résistance, de 60 à 70 MPa en compression pour une masse volumique de 1800 à 1900 kg/m³, difficile à dépasser en utilisant des granulats légers. Au-delà de

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

cette limite, l'augmentation du dosage en ciment et la diminution du rapport eau/ciment, tout en augmentant la masse volumique béton, n'apporterait plus d'amélioration à la résistance.

La rupture des éprouvettes, caractérisée par un ou plusieurs plans parallèles au chargement et par le fendage des granulats, témoigne alors d'un mode de rupture différent de celui des bétons de granulats rigides [Whi91]. L'ACI 213, précise que pour un même dosage en ciment, le plafond de résistance peut néanmoins être augmenté en diminuant la taille des gros granulats [ACI03].

Aussi, la résistance en compression peut augmenter, en remplaçant une partie des granulats fins légers par du sable naturel, bien que cette mesure augmente la masse volumique du béton pour une formulation donnée. La figure (1.2a), montre l'évolution de la résistance en compression, f_c et du module d'élasticité E , en fonction de la masse volumique du béton durci ρ_b pour diverses formulations tirées de la littérature [Wil88; Zah90; Lar92; Reg90].

D'autre part, on remarque sur la figure (1.2b) que le module d'élasticité des bétons légers, est directement lié à la masse volumique et non à la résistance. Les bétons à granulats légers de 1500 à 1900 kg/m^3 , sont ainsi caractérisés par un module d'élasticité de 15 à 25 GPa, inférieur à celui des bétons de granulats rigides. Les équations disponibles dans les différentes normes, s'expriment néanmoins en fonction de la résistance, car elles sont générales et s'appliquent également aux bétons de granulats rigides [Zha90] :

$$E = 43 \cdot 10^{-6} \rho^{15} \sqrt{f_c'} \quad \text{pour } f_c' < 40 \text{ MPa} \quad (1.3)$$

$$E = 9.5 f_c'^{0.3} (\rho / 2400)^{15} \quad \text{pour } f_c' < 85 \text{ MPa} \quad (1.4)$$

Avec E en (GPa), ρ en (kg/m^3), f_c' en (MPa) sur cylindres 150 x 300 mm, f_c en (MPa) sur cylindres 100 x 200 mm.

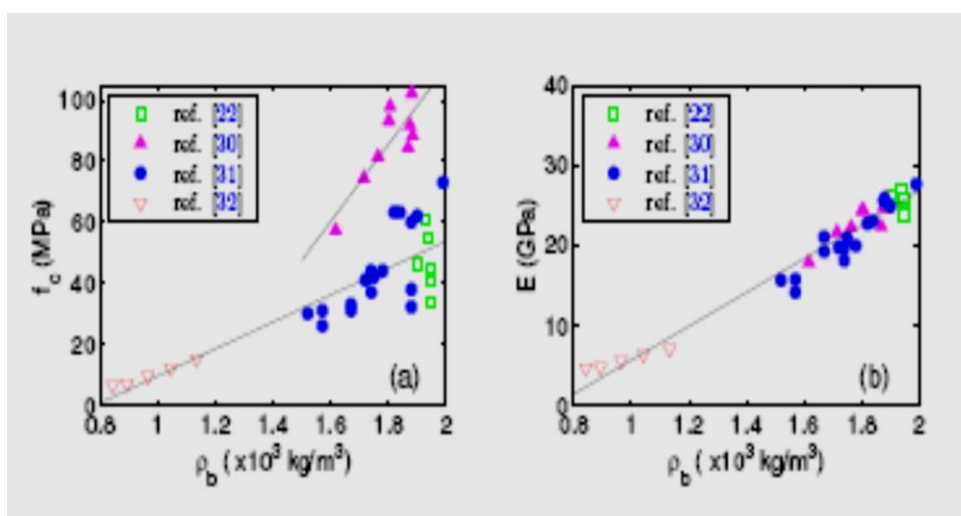


Figure 1.2 Résistance en compression (a) et module élastique (b) en fonction de la masse volumique du béton durci, résultats à 28 jours [(22) Wil88; (30) Zah90; (31) Lar92; (32) Reg90].

La figure (1.3), présente la relation contrainte-déformation des bétons de granulats légers sollicités en compression uni-axiale [Zha90; Sla86]. Cette figure, montre que le module élastique des bétons légers

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

ainsi que la linéarité de la relation contrainte-déformation augmentent en fonction de la résistance du matériau. Le matériau suit donc, un comportement d'autant plus fragile que sa résistance est élevée. Les déformations maximales des bétons légers, de l'ordre de 3,3 à 4,6 mm/m pour des résistances de 50 à 90 MPa, sont supérieures à celles des bétons de granulats rigides de même résistance.

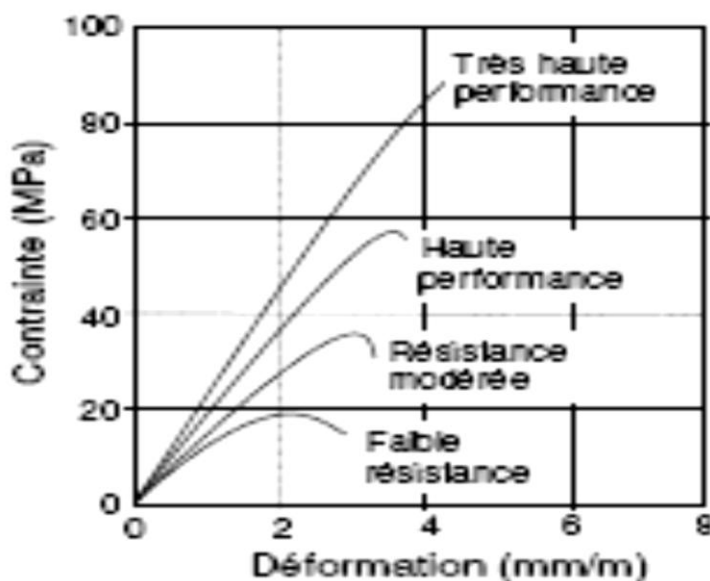


Figure 1.3 Relation contrainte-déformation des bétons de granulats légers soumis à un effort de compression uni-axial [Zha90].

Par ailleurs, le faible module élastique des granulats légers augmente les déformations instantanées du béton mais également les déformations sous charge. En effet, contrairement aux granulats rigides, les granulats légers ne gênent pas les déformations de la pâte de ciment [Ver05]. Le coefficient de Poisson moyen des bétons légers, est de 0,20, indépendamment de la résistance, des conditions de murissement et de l'âge. Les résultats obtenus varient cependant entre 0,13 et 0,24 pour des bétons conservés en chambre humide et entre 0,15 et 0,26 pour des bétons sous conditions ambiantes [Sla86].

Enfin, comme pour les bétons de granulats rigides, la résistance à la traction des bétons légers non renforcés, est relativement faible, d'autant plus que la propagation des fissures s'effectue à travers des granulats et non au niveau des interfaces. Wilson et al., ont mesuré des résistances au fendage de 3,3 à 4,2 MPa et des contraintes maximales en flexion de 5,0 à 7,6 MPa pour des bétons d'une masse volumique moyenne de 1940 kg/m³ [Wil88]. Les résultats de Zhang et al., sont du même ordre de grandeur, ils varient entre 3,5 et 5,6 MPa en fendage et entre 5,4 et 7,3 MPa en flexion pour des bétons de 1620 à 1885 kg/m³ [Zha91]. L'action des microfibrilles dans les bétons légers, est similaire à celle observée dans les bétons de granulats rigides, c'est-à-dire qu'elles permettent essentiellement, d'augmenter la ductilité du matériau suite à la localisation de la fissuration.

1.5. Propriétés élastiques des bétons légers

Le module d'Young d'un béton léger, est évidemment inférieur à celui du béton traditionnel en raison de sa faible masse volumique (modules des granulats légers sont plus faibles que les modules des granulats de densité normale). Généralement, le module d'Young d'un béton léger est considéré équivalent aux 3/4 de celui d'un béton traditionnel de même résistance. Le module d'élasticité augmente, lorsque la

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

résistance à la compression augmente [Nev00], cette relation (figure 1.4), a été confirmée dans les travaux de recherche de Willson et al., de De Larrard et al. et Zhang et al. [Wil88; Lar92; Zha90].

Cette évolution, est due au fait que le module d'Young est conditionné par le module d'élasticité du granulat et par les proportions volumétriques qu'il occupe dans le béton. D'autres relations, ont été trouvées, par exemple, le module d'Young n'est pas influencé par le mûrissement mais par le module d'élasticité du plus gros granulat. Les granulats légers, qui ont une masse volumique plus faible que la pâte de ciment, participent en conséquence à la baisse du module d'élasticité du béton. On note également, que l'excellente adhérence entre les granulats légers et la matrice cimentaire élimine le développement prématuré de la microfissuration de liaison [Nev00].

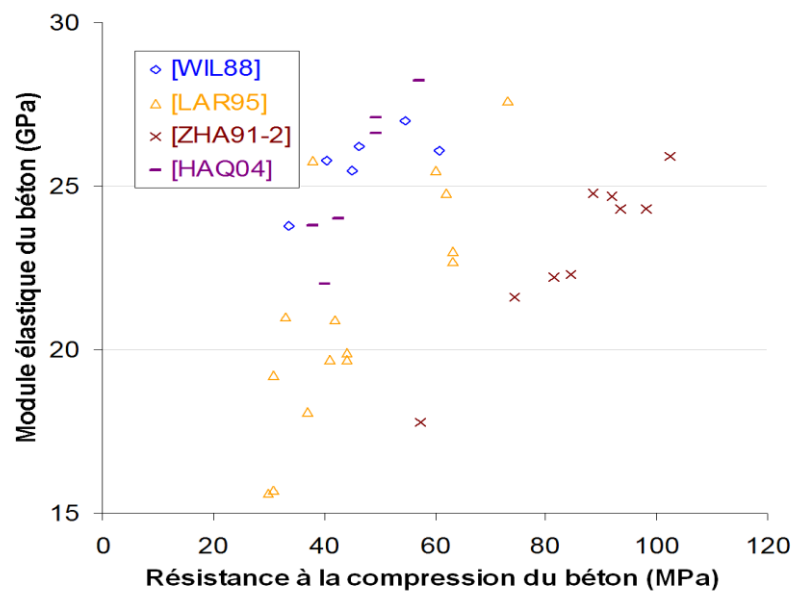


Figure 1.4 Evolution des modules d'Young de bétons légers en fonction de leur résistance à la compression [Wil88.], [Lar92], [Zha90].

1.6. Propriétés thermiques des bétons légers

La conduction thermique, est le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique, est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure [Ver05].

Les propriétés thermiques du béton, sont directement liées à celles de ses composants, matrice et granulats, ainsi qu'au degré de saturation du matériau. D'après Van Breugel, les bétons légers fabriqués avec les granulats obtenus à partir de procédés à très haute température, ont un coefficient de dilatation thermique qui peut varier entre 7 et $11 \times 10^6 / ^\circ\text{C}$ [Bre98].

Ainsi, il existe une forte relation entre porosité et faible conductivité thermique, elle doit être nuancée en tenant compte du mode de transfert de la chaleur dit convection. Cette dernière, traduit les transferts de chaleur entre un solide immobile et un fluide en mouvement. Lorsque le matériau contient un

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

important réseau de pores connectés, l'air peut s'y déplacer et les transferts de chaleur par convection, peuvent devenir significatifs. En revanche, un matériau contenant un grand nombre de pores occlus comme le béton cellulaire (80%), ne présente pas de convection. Plus de la moitié de l'air est immobile dans les pores occlus et la conductivité thermique est faible [Ver05].

Les propriétés thermiques des bétons légers, sont liées aussi au pouvoir absorbant de ces matériaux, qui peuvent contenir des quantités d'eau non négligeables. L'eau étant un excellent conducteur, elle induit une augmentation de la conductivité thermique du béton, en se substituant à l'air isolant. Cette dernière est corrélée à la teneur en eau massique des bétons légers par des formules empiriques [Ver05]. En dernier lieu, la chaleur massique est un autre élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux, la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse est de 1°C. Plus elle est élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de températures du milieu extérieur. On peut noter que le pouvoir isolant du matériau, dépend non seulement de la conduction thermique mais également de la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps [Ver05].

Les bétons légers, présentent également une meilleure résistance au feu que le béton traditionnel du fait de sa faible conductivité thermique (augmentation moins importante de la température dans le béton léger), de son faible coefficient de dilatation et de stabilité des granulats légers liée à leur fabrication à plus de 1100°C [ACI03].

1.7. Propriétés acoustiques des bétons légers

Lorsqu'un son est émis, une onde acoustique se propage dans l'air jusqu'à atteindre un obstacle. Lorsque cette onde incidente, rentre en contact avec un matériau, deux ondes sont créées: une onde réfléchie qui se propage dans le même milieu, alors que l'onde incidente et une onde transmise qui traverse le matériau de part en part. L'isolation acoustique, vise à limiter la transmission de ces sons par un matériau. Cette isolation, est généralement réalisée par de matériaux de forte densité, car leur inertie fait qu'ils sont plus difficilement mis en mouvement par les ondes acoustiques, ils génèrent donc, moins d'ondes transmises par vibrations. Les bétons légers, comme leur nom l'indique, ne fonctionnent pas par cet effet de masse [Ver05].

On peut également, limiter la transmission du son en imperméabilisant la surface du matériau. Les ondes sont alors, réfléchies et renvoyées vers la source émettrice. Les matériaux peu perméables, sont donc de bons isolants, dans le sens où ils empêchent la transmission du son entre deux pièces voisines. La troisième façon d'agir sur les ondes acoustiques, est l'absorption, les matériaux amortissent les sons par dissipation visqueuse. Cependant, ce mécanisme de dissipation d'énergie, suppose que les ondes puissent pénétrer dans le matériau et disposer d'un espace suffisant pour être amorties. Il faut donc, une certaine perméabilité et une porosité ouverte importante [Ver05].

La caractérisation des propriétés acoustiques des bétons légers, est basée surtout sur l'expérimentation avec plusieurs principes et dispositifs qui sont disponibles, nécessitant la reproduction des phénomènes sonores, sur des matériaux représentant les différents paramètres le caractérisant.

1.8. Durabilité des bétons légers

La durabilité du béton léger, est un facteur essentiel d'un point de vue économique et dépend principalement de son environnement et de sa composition. Il ressort de plusieurs recherches théoriques et expérimentales, étudiant son comportement vis-à-vis certain nombre de mécanismes susceptibles de le dégrader et en examinant les différents paramètres spécifiques à son sujet que l'utilisation des granulats légers, n'affecte pas sa durabilité à long terme ; la porosité des granulats est généralement discontinue et n'influence pas la perméabilité du béton. Les grands volumes de vides occasionnés par ces granulats, peuvent augmenter la perméabilité aux gaz des bétons légers, pour ce type de composites cimentaires, ce paramètre de premier ordre, conditionne presque toutes ses propriétés et, en premier lieu, sa résistance mécanique.

La résistance aux efforts de compression, est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et de l'établissement des spécifications de la conformité. Plus faible est la porosité, plus grande est la résistance, ainsi cette dernière, doit être complétée par d'autres mesures comme, par exemple, la perméabilité ou la diffusion et la distribution des tailles de pores ou leurs dimensions. A porosité égale, les agents agressifs, pénètrent d'autant plus difficilement que les pores, sont fins [Nev95].

Les bétons de même résistance à la compression, ne sont pas également durables, il existe des différences parfois importantes, aux critères de résistance, il faut ajouter d'autres considérations.

Comme dans les bétons de granulats rigides, l'air entrainé, permet de protéger efficacement le matériau contre le gel et l'écaillage [Osb85; Whi91; Zha89; Zha90; Kli61]. La résistance à la corrosion des bétons légers à haute performance, est cependant similaire à celle des bétons de granulats rigides.

Le retrait de séchage, lorsqu'il est empêché, induit des contraintes de traction qui peuvent rapidement dépasser la résistance à la traction du béton. Dans les bétons légers, l'intensité du retrait de séchage, influencée par la proportion volumique et la perméabilité de la matrice cimentaire, est également liée au degré de saturation des granulats. Dans les bétons légers à haute performance, la grande proportion volumique de matrice et le faible module élastique des granulats, augmentent le potentiel de retrait par rapport à un béton de granulats rigides de même résistance. L'homogénéité et la grande capacité de déformation des bétons légers, rendent néanmoins le matériau moins susceptible à la fissuration. La composition minéralogique des granulats légers manufactures, obtenue par des procédés de fabrication à très haute température, donne aux granulats une bonne stabilité face aux attaques chimiques et par rapport à la réactivité alcali-silice [Kli61]. Le bon choix du type de ciment et du rapport eau/ciment, est cependant essentiel pour assurer la durabilité des bétons légers face aux agressions chimiques.

1.8.1 Le phénomène de cure

Le béton léger est moins sensible que le béton traditionnel à l'influence des conditions de conservation [Vir86]. L'eau contenue dans les bétons légers, absorbée par les granulats légers empêche la dessiccation rapide en atmosphère sèche et compense l'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment. A l'air libre, un béton traditionnel perd selon l'humidité relative, jusqu'à 40% de sa résistance, alors que le béton

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

léger ne perd que 25% de sa résistance. Lorsque le degré de saturation de la pâte de ciment diminue, en raison de la réaction d'hydratation ou de séchage, due aux conditions de cure, un gradient d'humidité apparaît. Le granulat léger joue alors le rôle de réservoir d'eau, ce dernier migre par succion capillaire vers la pâte, permettant ainsi, la poursuite d'une hydratation efficace [Web97; Ben01].

L'augmentation de la température interne au cours de l'hydratation du ciment a une influence sur les propriétés du béton, se trouvant dans la température de l'environnement dans lequel il est maintenu en cure. Un béton qui durcit à une plus grande température, aura une résistance élevée au jeune âge, mais elle conduit à une résistance à la rupture inférieure à celle obtenue lors de durcissement dans des conditions normalisées. En effet, Lors du durcissement des bétons légers et selon la chaleur dégagée par l'hydratation du ciment, ils peuvent être soumis à une plus forte augmentation de température que les bétons de granulats rigides. De plus, étant donné leur meilleure capacité d'isolation, cette élévation peut s'étendre sur une plus longue période et par conséquent, favoriser les gradients thermiques [Moh14].

1.8.2 L'interface pâte/granulats

Dans plusieurs études, il a été prouvé l'existence d'une auréole de transition au niveau de la liaison de la pâte de ciment et des granulats. L'épaisseur et la porosité de la zone de transition dépende des échanges d'eau à l'interface pâte/granulat, c'est-à-dire des capacités d'absorption des granulats. La principale raison, pouvant expliquer la présence des auréoles de transition est que, pendant le malaxage, les grains de ciment secs ne peuvent se coller étroitement aux gros granulats, conduisant à une augmentation de la porosité et une baisse de la résistance. Elle se caractérise, par une première couche de texture très fine fixée aux granulats et une deuxième couche très poreuse. Cette dernière, en raison de sa faible résistance mécanique, due à la présence de cristaux de grandes dimensions, est facilement clivable, en raison de sa forte porosité, constitue le point faible des bétons soumis à des actions mécaniques [Bar82]. En effet, dans le cas des granulats classiques, la zone inter-faciale, est plus poreuse et est plus importante que la pâte du ciment hydratée, située à une certaine distance des gros granulats [Yan08]. Une telle zone, existe également en bordure des granulats fines, mais son épaisseur est plus faible [Nev00b].

De nombreuses études, se sont intéressées à l'effet des granulats légers à savoir celles issus du recyclage sur la zone de transition et sur la résistance du matériau dans son ensemble. A.M Neville explique, que l'eau absorbée par les granulats au moment du malaxage, devient disponible avec le temps pour hydrater les grains de ciment qui ne l'étaient pas complètement. Comme la majeure partie de cette hydratation additionnelle se produit à l'interface de la pâte de ciment et de granulat, l'adhérence entre les granulats et la matrice, s'en trouve renforcée [Nev00b]. Elsherif et al., ont comparé l'interface pâte granulats autour de granulats légers et de granulats classiques. Ils ont pu observer que, non seulement l'auréole de transition et de taille réduite autour des granulats légers (10 à 15 μ m) comparativement à celle qui entoure les granulats traditionnels (jusqu'à 35 μ m) mais cette auréole se trouve plus dense que le reste de la pâte de ciment hydratée [Els05]. Virgolieux a modélisé le transfert des efforts (figure 1.5), il a reproduit le transfert des efforts entre pâte et granulats rigides dans la figure 1.5 (a) et ceux entre pâte et granulats très déformables dans la figure 1.5 (b).

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

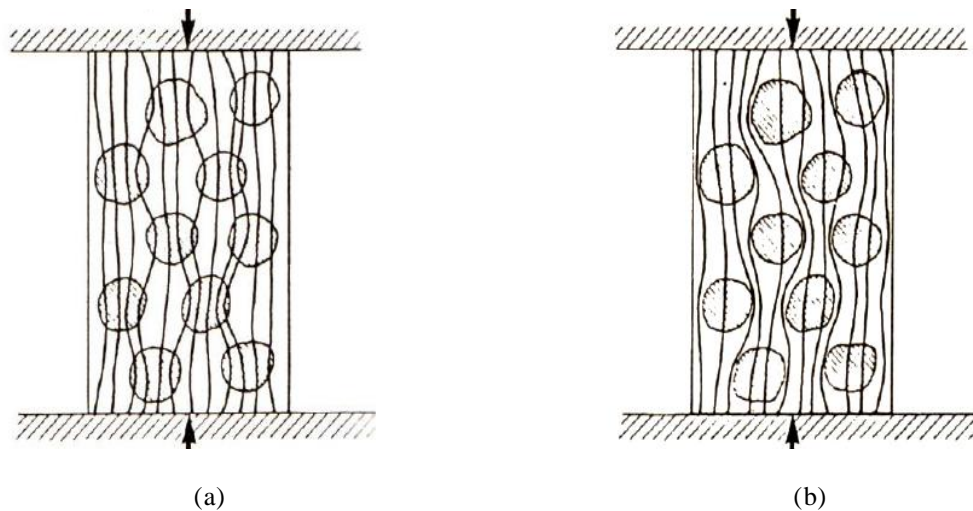


Figure 1.5 (a) Transfert des efforts dans le Modèle pâte granulats, **(b)** Transfert des efforts dans le Modèle pâte granulats très déformable [Vir86]

La rugosité des granulats, due à leur porosité, explique également une meilleure adhérence avec la pâte. Pour A.M. Neville, cette rugosité contribue à la bonne imbrication mécanique des deux matériaux: il ajoute qu'il y a souvent pénétration de la pâte de ciment dans les pores ouverts à la surface des gros granulats [Nev00b]. Il faut ajouter que la nature des granulats, peut influencer sa liaison avec la pâte. D'après Neville et Tasong, les caractéristiques minéralogiques du granulat fin, ont une influence sur la microstructure de l'auréole de transition, dans le cas d'un granulat calcaire, il y a réaction chimique entre le granulat et la pâte de ciment, ce qui a pour effet de densifier la zone inter-faciale [Nev00b; Tas99]. Plus les granulats absorbent de l'eau, moins il s'accumule dans la matrice fraîche à proximité du granulat. En conséquence, la zone de transition devient moins poreuse et plus dense. L'absorption d'eau dépend toutefois du degré de saturation initiale des granulats. Ainsi, ce processus physique d'absorption d'eau est responsable au jeune âge (1 jour) d'une amélioration de 25% de la résistance des bétons, pour une augmentation de la capacité d'absorption des granulats de 200% [Was96]. Le béton le plus résistant est celui obtenu avec des granulats possédant la plus forte absorption. Selon Zhang et al., citant les travaux de Fagerland et Khokhrin, la zone de transition peut être plus dense que la matrice et donc plus résistante. Le rôle du filtre joué par les granulats légers est de diminuer le rapport E/C au voisinage des granulats par rapport au reste de la matrice [Zha90]. Ces recherches, ont été complétées par Elsharif et al., (figure 1.6) en quantifiant la porosité autour des granulats à l'aide d'analyse d'image obtenue par BSE (Electrons Rétrodiffusés) [Els05].

Deux zones se distinguent sur cette figure : la zone la plus proche du granulat présente une porosité plus importante que celle du reste de la matrice sur environ 10 μm , au-delà et jusqu'à environ 50 μm la porosité est à l'inverse plus faible. La quantité d'eau de ressuage, est plus élevée à la surface du granulat et diminue lorsque la distance au granulat augmente. L'absorption d'eau par les granulats va créer un déplacement d'eau de la pâte vers ces derniers. La quantité d'eau par rapport à celle de la pâte reste en excès sur les 10 premiers microns de l'interface mais, au-delà, sur une distance d'au moins μm le rapport E/C devient plus faible que le rapport E/C de gâchage. La pâte située entre 10 et 50 μm du granulat, est donc plus dense que le reste de pâte. La diminution de la porosité, dépend des capacités d'absorption des granulats. Les granulats immergés 24 heures avant le gâchage, absorbent encore de l'eau et présentent le même processus physique que les granulats secs avec toutefois une plus faible intensité.

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

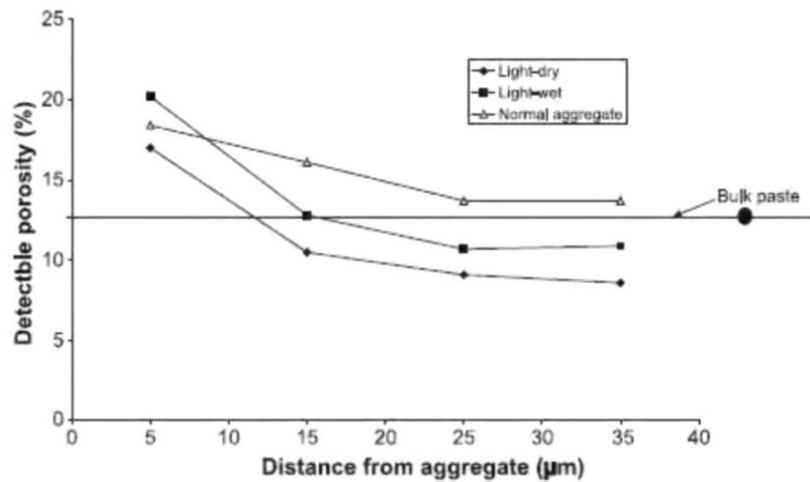


Figure 1.6 Évolution du pourcentage de porosité en fonction de la distance à la surface de granulat [Els05].

En ce qui concerne les granulats légers, leur plus forte porosité réduit l'effet de paroi, et la zone de transition diffère des granulats normaux. La zone inter-faciale mise en évidence par différents auteurs est de faible épaisseur et est caractérisée par des liaisons mécaniques et chimiques entre la pâte et les granulats [Lo04; Zha90]. En ce qui concerne les granulats d'argile expansée, la zone inter-faciale est très étroite de 5 à 10 µm d'épaisseur où l'on distingue un réseau plus poreux composé d'aiguilles d'ettringite [Lo04].

La pâte de ciment, peut en effet venir se loger entre les rugosités et les pores à la surface des granulats légers, il se produit alors un ancrage mécanique qui améliore l'adhérence des granulats à la pâte de ciment [Zha90], des granulats et la structure de l'enveloppe externe des granulats. Selon Wasserman et al., cet ancrage mécanique, ressemble au phénomène d'imprégnation, entraînant le dépôt de portlandite (CH) précédemment décrit [Was96].

1.9. Utilisation des pneus usés dans le génie civil

L'accumulation des déchets solides, a généré de sérieux problèmes environnementaux, d'où ressort l'idée de la valorisation de ce flux de matières abandonnées, cette solution est devenue par le temps, un impératif économique. Selon Angle et al., les avantages du recyclage, sont la réduction de la mise en décharges publiques, préservation de l'environnement, et d'autre part, la réduction de la consommation de l'énergie pendant le processus de la production [Ang01]. Les applications les plus appropriées pour les recyclages, sont ceux qui minimisent la nécessité d'une séparation, classification et transformation industrielle du produit ainsi que le risque de la valorisation de n'importe quel matériau résultant du recyclage.

Plusieurs recherches sont en cours ces dernières années, elles étudient de nouveaux mélanges de béton et de mortier de ciment avec ces matières abondantes présentant des propriétés assez particulières surtout sous forme de granulats, en essayant d'opter pour le remplacement de certaine quantité des granulats ordinaires. Ces granulats recyclés, sont incorporés dans la formulation de béton, en remplacement des granulats naturels dans des proportions variant de 0 à 100 %.

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

La littérature scientifique est abondante sur ces tentatives d'utilisation de ces produits dans les composites cimentaires [Ser13], on y recycle plusieurs types de déchets :

- Les céramiques [Pau09]
- Les déchets issus des démolitions briques [Poo06 ; Deb10]
- Bétons recyclés et concassés [Gom02; Tu06; Kou11; Rah05].
- Des résines de polyester insaturées issues du recyclage de déchets plastiques [Reb96].
- Des agrégats de béton recyclés renforcés de tubes d'acier [Yan06].
- Des agrégats de béton avec briques d'argile réduites en poudre [Poo06].
- Poudre de verre recyclé [Ter06].
- Les pneus [Li04; Seg02].
- les verres [Tun11]; [Kou09]; [Top08].
- Poudrette de caoutchouc [Tur07; Gar07; Ben02], le polyéthylène issu de déchets de câbles électriques, du bitume provenant des chaussées [Hua05] et le P.V.C (polychlorure de vinyle) issu de déchets de bouteilles plastiques [Bab98] dans la géotechnique routière.

Certaines études, se consacrent à montrer l'effet bénéfique de ces valorisations sur l'environnement (réduction de la production de CO₂ par diminution d'extraction de la matière première et du transport). Pour développer l'utilisation des granulats recyclés dans la production des composites cimentaires, il faut démontrer techniquement la faisabilité de l'incorporation de ces matériaux avec les qualités demandées. Ces démonstrations, nécessitent l'élaboration et la caractérisation des bétons incorporant ces granulats recyclés. Des bétons témoins, sont toujours fabriqués pour établir un point de comparaison.

L'étude des effets des granulats recyclés sur les propriétés des composites, sont multiples, certains chercheurs ont travaillé sur l'ouvrabilité constante [Deb10; Lev04], ils ont étudié les paramètres: temps de malaxage, degré d'humidité des granulats recyclés et la quantité d'eau globale et effective à mettre en œuvre [Gom02], ainsi, que le taux de remplacement des granulats ; massique ou volumique, en gardant les autres paramètres de composition (quantité de ciment, rapport E/C, etc.....) [Olo02] servant pour le control. Tandis que, certains chercheurs travaillent avec une méthode de mortier équivalent où on considère que la matrice cimentaire présente dans les granulats recyclés, rentre en ligne de compte dans la matrice cimentaire du nouveau béton [Abb09]. Dans ce travail, on se limitera à l'étude des bétons légers incorporant des granulats issus des pneus usagés.

Selon Kamimura, le pneu usé est défini comme pneu inutilisable quand il est physiquement endommagé, la toile cassée, il ne se prête plus à tout type d'utilisation en tant que pneu, on ne peut pas le rechapier et il est même impossible de le réindustrialiser [Kam02].

Les pneumatiques usagés demeurent stables et non biodégradable, lorsqu'ils sont enfouis, ils se décomposent donc très lentement et ne produisent ni Lixiviat ni Biogaz susceptibles de contaminer l'air, le sol ou la nappe phréatique à court terme. Ils sont aussi valorisés dans des filières énergétiques comme combustibles pour produire des calories, comme ils peuvent être valorisés dans le génie civil sous forme de

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

granulats associés à des liants hydrauliques ; ceci constitue une nouvelle source d’approvisionnement, permettant de valoriser au mieux un important volume de ce déchet sous forme de granulats de caoutchouc recyclé.

1.9.1 Domaines d’utilisation du déchet pneumatique dans le Génie Civil

Les chercheurs tentent constamment de trouver des méthodes innovantes pour réutiliser les granulats de caoutchouc dans de différentes applications, des recherches approfondies ont été menées dans le domaine génie civil.

1.9.1.1 Le caoutchouc recyclé dans la géotechnique routière

La valorisation des pneumatiques en travaux public, est moins contraignante et présentent des avantages écologiques appréciables aux plans du potentiel de réchauffement global, de l’acidification et de la consommation totale d’énergie. L’addition du caoutchouc granulaire aux liants bitumineux ou même dans les structures des chaussées, a des avantages appréciables :

- Plus grande durabilité
- Résilience de la surface
- Entretien réduit
- Plus grande résistance à la déformation et à la fissuration
- Plus grande résistance à la fissuration aux basses températures
- Plus grande viscosité et rigidité.
- Contribue à la réduction des bruits de roulement
- Remplace des matériaux vierges tels que le styrène butadiène-styrène

En réalité, quand les pneus sont jetés ou éliminés, ils n’ont perdu que quelques grammes de leurs masses initiales [Adh00]. Ils ont un fort potentiel de souplesse et de résistance. Ils recèlent de nombreuses qualités dont on tire profit dans le domaine des infrastructures routières. Une fois enterrés et à l’abri des ultra-violets, les pneus usés ne subissent pas de corrosion et ne sont pas polluants, ils peuvent être utilisés soit, entiers (moins de 5%), soit sous forme de demi-produits (plus de 95%). Certains centres de recherche, ont développé une application pour les fibres textiles issues de la granulation de pneumatiques usagés. Ils sont utilisés sous forme de granulats ou de poudrette pour la fabrication des enrobés destinés aux couche de roulement des chaussées sous de différentes fractions granulométriques (0 à 0,5 mm, 0,5 à 2 mm, 2 à 7 mm, et 7 à 15 mm).

La première application du bitume/caoutchouc, en France, a été en 1965, mais l’idée a été ensuite abandonnée. Le procédé s’est développé ensuite aux Etats- Unis et a fait l’objet d’un brevet. Le principe a été d’incorporer la poudrette de caoutchouc dans le bitume pour améliorer ces performances physico-mécaniques à de différents dosages. Cette utilisation, se développe peu face au développement de l’emploi généralisé des polymères dans les liants modifiés.

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

Plusieurs études de composition d'enrobés, ont été réalisées dans le cadre des projets de recherche, concernant l'industrie des travaux publics, afin de vérifier les caractéristiques des produits et d'optimiser le dosage du caoutchouc à incorporer. Ces études, ont pour avantage de remplacer des matériaux naturels par: élastomères thermoplastiques, caoutchouc naturel, latex, sans pour autant diminuer la qualité des revêtements.

Dans le but d'améliorer la stabilité thermique et les caractéristiques des revêtements routiers, certains ont évalué quelques propriétés techniques fondamentales tels que: le compactage, la compressibilité, la perméabilité, la résistance au cisaillement, module d'élasticité et le coefficient de poisson [Adh00]. Une des possibilités étudiées, est l'incorporation de caoutchouc recyclé dans l'asphalte, dont les toutes premières études ont été prometteuses. Elles ont montré que l'asphalte caoutchouté, avait une meilleure résistance au dérapage, une fissuration par fatigue réduite et une meilleure longévité [Ada85].

Les procédés d'incorporation de caoutchouc recyclé, consistent en la substitution d'une partie des granulats de l'asphalte par des granulats de caoutchouc. Autres recherches menées, ont permis de montrer l'influence des caractéristiques physico-chimiques de la poudrette de caoutchouc sur le bitume.

Il a été prouvé, que le caoutchouc synthétique, favorise le vieillissement du bitume modifié, et que la poudrette de caoutchouc joue également un rôle important dans la fabrication d'enrobés antibruit, l'amélioration des performances acoustiques, le son du roulement des pneus est réduit. Young et al., ont montré que lorsque les coupeaux des pneus usés sont soumis au cisaillement direct, la résistance au cisaillement augmente avec la taille et la teneur en caoutchouc [You03]. Aussi, Rao et al., ont montré que le sable mélangé avec les coupeaux jusqu'au 20% en volume, peut être une matière potentielle pour les chaussées et la construction des remblais par rapport au sable seul [Rao 06]. Ainsi l'incorporation de fibres traitées, permet la fabrication d'enrobés bitumineux plus résistants, d'améliorer la durée de vie de l'ouvrage puisque sa résistance à la fatigue, s'élève de 20% pour un prix supérieur de 2,5% seulement. Cependant, il a été estimé que l'utilisation des granulats de caoutchouc, de granulométrie inférieure à 1,2mm dans les chantiers routiers, entraîne un surcoût de 10% par rapport à l'emploi d'un bitume non modifié. Cette différence, est compensée par une durée de vie supérieure du bitume traité et par des propriétés thermiques meilleures [Ben09].

Plusieurs initiatives menées ces dernières années, ont montré qu'il était possible de valoriser l'ensemble du pneu, c'est-à-dire aussi bien le caoutchouc que les renforts métalliques et textiles qui dans le passé étaient mis en décharge. Une recherche, a été lancée, elle s'axe sur les procédés innovants de traitement de la fissuration des chaussées routières, principalement dans les zones à haute température, des planches d'expérimentation par inclusion d'un pourcentage de 10 et 15% de poudrette dans l'asphalte, ont été prévu au sud Algérien (haute température), ceci a été censé de donner une souplesse aux enrobés afin d'éviter le phénomène de fissuration et en même temps réduire la nuisance sonore [Ben09].

1.9.1.2 Applications des pneus usés dans le sol

En plus de l'emploi du caoutchouc, directement dans des matrices cimentaires sous forme de granulats, ou dans la géotechnique routière on peut l'incorporer dans le corps des remblais (figure 1.7), afin de renforcer leurs structures et/ou diminuer leurs charges. Ils sont déchiquetés et utilisés avec des couches de

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

sol pulvérulent, comme substituts des agrégats naturels lors de l'établissement des réseaux de drainage.

Aussi, il est utilisé comme matière de remplissage légère pour les ouvrages de soutènement. Des murs de soutènement traditionnels ont été comparés à des murs de soutènement construits avec des pneus déchiquetés, ces derniers, se sont révélés assez stables et entraînent une diminution de 60 % du coût des ouvrages remplis de sable [Reg90]. Comme, il a été employé entier (figure 1.8) ou partiellement découpés ou entièrement découpés, sous forme de nappes, pour avoir une bonne résistance et une meilleur répartition des efforts dans la masse du sol et sur les fondations. Il est mélangé au liant polyuréthane et coulé in situ, afin de réaliser le revêtement des sols de salles de sport de terrains de jeux et des pistes d'athlétisme (revêtements minces, souples et amortissant les chocs).



Figure 1.7 Pose des nappes de pneus projet pilote route de Bousmail (www.mtp.gov.dz).

En outre, la résistance à la déformation des pneus usagés et leur forte porosité, rendent leur utilisation intéressante en bassin de rétention des eaux pluviales. Les pneus offrent donc, une rigidité à la structure, en conservant un volume d'eau important et un cout plus faible par rapport à un autre matériau.



Figure 1.8 Ouvrage de Mostaganem RN11 (Algérie) [Ben09].

Comme on peut les incorporer dans le corps des remblais, afin de renforcer leur structures et/ou de diminuer leurs charges. Des pneus déchiquetés sont utilisés avec des couches de sol pulvérulent comme

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

substituts des agrégats naturels lors de l'établissement des réseaux de drainage. Donc de différentes voies de valorisation sont envisageables.

1.9.1.3 Le caoutchouc recyclé dans l'industrie des composites cimentaires

A défaut d'un rechapage, on peut soumettre les pneus usés en fin de vie à un découpage, déchiquetage ou broyage, permettant de récupérer leurs matériaux sous forme de granulats à plusieurs tailles, pouvant servir ensuite dans de diverses applications, tels que la fabrication des bétons. Les granulats occupent une grande partie du volume de béton et leurs caractéristiques influencent de manière significative les propriétés. Les propriétés des nouveaux bétons, sont sensiblement affectés par la gradation, la forme et la texture du caoutchouc ainsi que la façon dont elle est obtenue, susceptibles de varier sur une large gamme. Plusieurs pays pouvant profiter de cette débouche pour les déchets pneumatiques, telle que l'Algérie qui a encore du mal à atteindre ce moyen efficace de recyclage.

Autrement dit, le génie civil, selon la littérature, offre des débouchés très intéressants aux granulats issus du recyclage des pneumatiques, fabriqués directement à partir de caoutchouc naturel pour cette utilisation, ce qui représente un intérêt environnemental et économique majeurs. Le taux de recyclage de pneumatiques usagés est donc loin de couvrir l'ensemble des besoins de ce large domaine.

Généralement, les caoutchoucs sont utilisés dans le béton comme matériaux de substitution à la masse granulaire à différentes formes et proportions. Selon la composition, il a été utilisé, en incluant des fibres d'acier et du textile (le cas de cette recherche), comme il a été traité avec une solution d'hydroxyde de sodium pour améliorer son adhérence avec la pâte de ciment [Ser00] et la bande de roulement des pneus par Topçus [Top95], etc.... En effet, le caoutchouc offre des caractéristiques intéressantes du point de vue durabilité, de la densité et de l'élasticité.



Figure 1.9 Béton à base de granulats de caoutchouc [Oik06].

Les bétons légers, obtenus par incorporation des granulats de pneus usagés trouvent des applications relativement courantes dans la confection des structures isolantes ou bien celles destinées à porter des faibles charges. Ces bétons possèdent une capacité améliorée d'absorption de l'énergie d'impact ainsi qu'une meilleure résistance à la fissuration. Les travaux menés au Brésil, ont principalement porté sur son utilisation dans des barrières d'autoroute et la fabrication d'autres produits, en mélangeant les

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

composants du béton traditionnel à des granulats de caoutchouc.

Lorsque on se réfère aux données disponibles dans la bibliographie, il apparaît très clairement que l'utilisation des pneus usés sous forme de granulats dans les matériaux à base cimentaire est discutable, et ceci compte tenu de l'impact préjudiciable vis-à-vis résistances mécaniques, propriétés de références de ces composites.

C'est pour cette raison, que les recherches entreprises ces derniers temps, ont placé sur le premier plan l'identification du dosage des granulats en caoutchouc permettant d'avoir des composites cimentaires aux propriétés recherchées, en exploitant les applications rendues possibles par leurs propriétés. Il s'agit donc d'une recherche des voies de valorisation.

1.10. Durabilité de l'ensemble béton /matériau recyclé

Parmi les travaux de recherche, effectués sur les composites cimentaires incorporant des déchets, l'étude de leur durabilité, l'idée d'introduire des matériaux recyclés dans des bétons ou des mortiers, afin d'améliorer leurs performances tout en gardant les qualités mécaniques, était donc séduisante.

En effet, plusieurs chercheurs ont prouvé que l'utilisation de ces matériaux affecte la tenue des bétons réalisés avec des granulats issus du recyclage. Pour faire face à ces inconvénients, leur emploi serait limité dans des conditions bien spécifiées. Les conclusions de la plus part de ces études, se basent sur l'observation de certains paramètres nommés indicateurs de durabilité : la porosité ; l'absorption de l'eau, la perméabilité à l'oxygène, la diffusion des ions chlore, les profondeurs de carbonatation ou encore le retrait de dessiccation [Sag01; Olo02], sans oublier la tenue au gel-dégel et les attaques par acides dans les milieux chimiquement agressifs, qui a été la baisse de la durabilité due à l'incorporation des granulats recyclés. Aussi, ces conclusions sont valables pour tout type d'environnement agressif (eau de mer, eaux à forte teneur en sulfate).

Les études sur la durabilité des bétons de granulats légers sont moins négatives. Il faut noter que l'une des principales différences entre granulats recyclés et granulats légers, est l'ouverture de leur porosité. Les derniers possèdent généralement une surface vitrifiée (ceci est toutefois très dépendant du mode de fabrication) qui isole la porosité à l'intérieur du granulats. Dans ce cas, la pré-saturation des granulats n'est pas forcément nécessaire avant leur mise en œuvre. On n'observe donc pas d'augmentation du rapport E/C, aussi, les granulats légers ne posent pas de problèmes sérieux pour la durabilité, car le réseau poreux est généralement discontinu [Nev00b]. Leur porosité ne modifie pas donc la perméabilité du béton, généralement contrôlée par la perméabilité de la pâte de ciment.

1.11. Propriétés des composites cimentaires caoutchoutés

1.11.1. Propriétés des Bétons caoutchoutés à l'état frais

Les caoutchoucs ont fait l'objet de plusieurs recherches, bien qu'elles ne reflètent pas spécifiquement tous les aspects de la formulation d'un béton, elles ont toutefois, permis de cerner les principales propriétés du béton que l'on est susceptible d'obtenir avec ces matériaux. La plupart d'eux,

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

s'accorde sur la faisabilité de cette valorisation.

1.11.1.1. Ouvrabilité

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du béton, dans la pratique, on se base souvent sur des essais d'ouvrabilité mesurant l'affaissement ou l'étalement. Güneyisi et al., ont étudié les propriétés mécaniques des bétons de caoutchouc dont 0% à 20% de la masse du ciment, a été remplacée par la même masse de fumée de silice. Ces auteurs ont observé que l'affaissement du béton a diminué avec l'augmentation de la quantité du caoutchouc, alors que pour le dosage de 50% de granulats de caoutchouc, l'affaissement a été presque nul [Gun04].

La Figure 1.10(a), montre l'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en granulats de caoutchouc et de la fumée de silice [Gun04]. Khaloo et al., ont suggéré qu'il fallait chercher d'autres méthodes pour mesurer correctement l'affaissement du béton incorporant des granulats en caoutchouc, leurs résultats ont été un peu différents par rapport à d'autres auteurs. Ils ont conclu, que le béton incorporant les granulats de caoutchouc, a une maniabilité acceptable en termes de facilité de manipulation, de mise en œuvre et de finition (Figure 1.10(b)) [Kha08]. Les résultats de ces deux chercheurs, montrent que la procédure ordinaire pour évaluer l'affaissement, n'est pas appropriée à ce composite cimentaire.

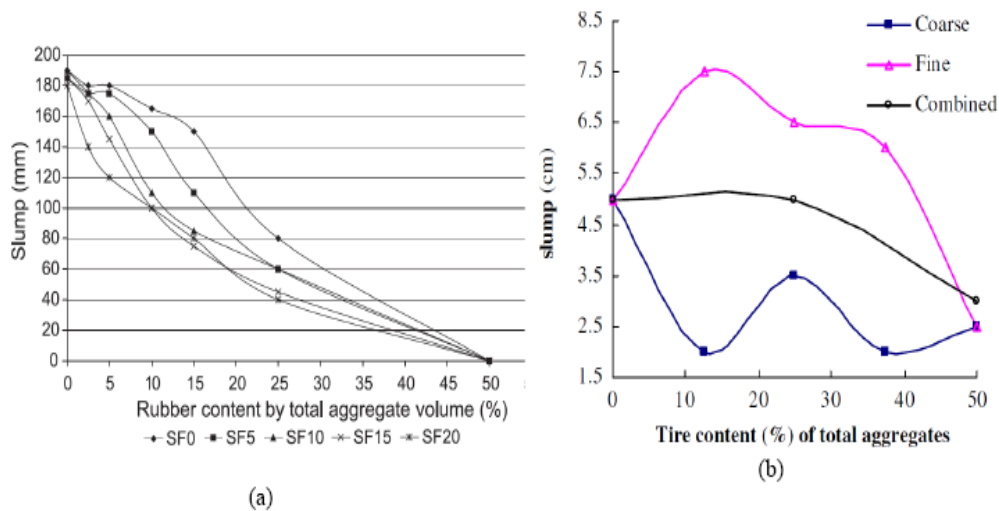


Figure 1.10 Influence de granulats en caoutchouc sur l'affaissement (a) [Gun04], (b) [Kha08].

Pour une faible teneur en caoutchouc, Cairns et al., ont trouvé une maniabilité acceptable avec une réduction de l'aptitude au façonnage [Cai04]. D'autres auteurs ont étudié les bétons contenant des fumées de silice avec la poudrette de caoutchouc, ils ont constaté, qu'une teneur en caoutchouc de 50% conduit à des mélanges sans maniabilité [Gun04]. Albano et al., ont remplacé les granulats fins par 5% et 10% de granulats de caoutchouc, ils ont enregistré une diminution de 88% dans l'affaissement du béton [Alb05]. Bignozzi et al., ont utilisé des granulats de caoutchouc de (0,5 à 2 mm) et de (0,05 à 0,7 mm) en remplacement de 22,2% et 33,3% des granulats fins dans des bétons auto-plaçant, ils ont constaté que l'incorporation des granulats de caoutchouc n'a pas influencé l'aptitude du façonnage de ces mélanges [Big06].

Autres chercheurs, ont employé la poudrette de caoutchouc dans le béton en remplacement du sable à des taux de l'ordre de (20, 40, 60 et 100%), ils ont conclu suite aux résultats obtenus que le caoutchouc affecte la maniabilité des mélanges [Bat08].

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

Garros, dans sa recherche, relative à l'incorporation des granulats de caoutchouc dans les bétons auto-plaçant, a montré que la présence de ces granulats, entraîne une modification des propriétés des bétons à l'état frais, la modification la plus remarquable été la chute du pourcentage de l'étalement avec l'augmentation de teneur en caoutchouc. Il a conclu à la fin, que l'augmentation du dosage en caoutchouc, affecte l'ensemble des paramètres rhéologiques et que l'incorporation de ces granulats, conduit à des mélanges plus visqueux et présentant des seuils de cisaillement plus importantes [Gar07].

Taux des granulats de caoutchouc (%)	Affaissement (mm)
0	75
20	61
40	36
60	18
80	10
100	05

Tableau 1.1 : Affaissement des bétons incorporant des granulats de caoutchouc [Bat08].

Les résultats de Batayneh et al., résumés dans le tableau 1.1 ci-dessus, confirment les constatations de Senouci et al., à propos de l'influence des granulats de caoutchouc sur l'ouvrabilité des bétons vibrés. Les auteurs ont expliqué cet effet en considérant que les granulats de caoutchouc constituent une structure autobloquante et donc résistante à l'écoulement [Eld93; Bata08]. Pour Reda et al. [Red03], la chute de l'ouvrabilité avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc, peut être attribuée à une friction plus élevée entre ce type de granulats et la pâte. Eehab et al., ont utilisé les granulats de caoutchouc sur des échantillons de béton à de différentes tailles (un maximum de 2 mm) avec des remplacements volumiques du sable de l'ordre de 10%, 20%, 30% et 40% de. Selon leurs résultats, une diminution de 11,5% de l'ouvrabilité pour 0% à 40% de teneur en caoutchouc [Eeh15]. Güneyisi et al., ont fait leur recherche avec des granulats en caoutchouc en remplacement partiel des gros granulats à de différents taux. Selon les résultats de ces tests, le diamètre d'écoulement des mélanges ordinaires est entre 680 et 750 mm, alors que celui des composites caoutchoutés est entre 560 et 710 mm [Gün16].

Les travaux de plusieurs chercheurs, ont démontré que les granulats de caoutchouc provoquent une diminution de l'aptitude au façonnage et la maniabilité des composites cimentaires et par conséquent, la dépendance de ce paramètre de la teneur et des caractéristiques des granulats de caoutchouc.

1.11.1.2. Masse volumique

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition, en particulier, de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des granulats de caoutchouc en substitution des granulats ordinaires, a naturellement une masse volumique plus faible que celle d'un béton léger classique. Si on se réfère à la classification des bétons légers, on peut envisager la production de bétons légers de structure avec l'incorporation de granulats de caoutchouc.

Comme le montre la figure 1.11 (a), Güneyisi et al., ont observé une chute de 25% de la masse volumique à un taux de substitution de 50% de granulats de caoutchouc par rapport au béton de référence [Gün04]. Alors que Kaloush et al., ont démontré dans leur recherche, une diminution de la masse volumique

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

de l'ordre de 102 kg/m^3 pour chaque 22,7 kg de granulats de caoutchouc contenue dans le béton (Figure 1.11 (b)) [Kal05].

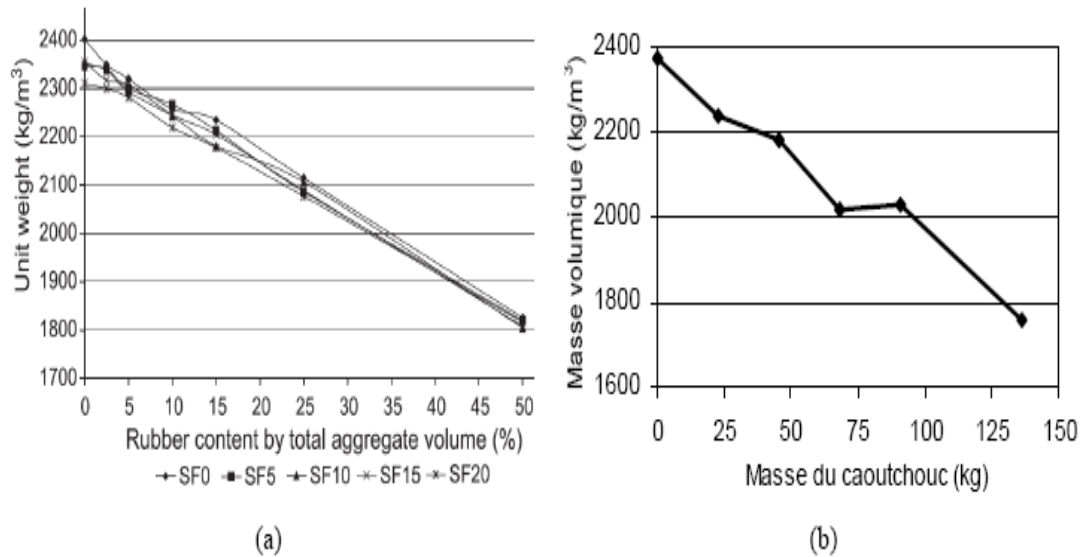


Figure 1.11 Variation de la masse volumique du béton incorporant des granulats de caoutchouc (a) [Gun04], (b) [Kal05].

Selon Garros, pour ce qui est de la masse volumique des bétons auto-plaçant incorporant des granulats en caoutchouc, ces bétons peuvent être classés parmi les bétons légers. La différence entre la densité des granulats naturels (2,6) et celle du caoutchouc (2,2), suffit pour expliquer les tendances observées [Gar07].

1.11.1.3. Teneur en air occlus

D'après Khatib et al., la teneur en air occlus augmente avec le volume de caoutchouc. C'est ce qui est illustré par la Figure 1.12 où le groupe (A) correspond à un béton pour lequel le sable a été remplacé par la poudrette de caoutchouc et le gravier a été remplacé par de gros granulats de caoutchouc dans le cas du groupe (B), tandis, qu'ils ont substitué le sable et le gravier par poudrette et granulats de caoutchouc dans le groupe (C). Ces auteurs ont observé que la teneur en air occlus du groupe (B) est inférieure à celle du groupe (A), lorsque le volume de caoutchouc dépasse 30% du volume total des granulats. Cette diminution, peut être expliquée par la compacité plus élevée du groupe (B) à même volume de granulats de caoutchouc [Kha99].

Pour Fedroff et al., la teneur en air occlus dans les bétons caoutchoutés est plus importante que celle des bétons ordinaires, même sans agent entraîneur d'air. Ces chercheurs, pensent que la granulométrie ouverte et surtout la surface rugueuse des particules de caoutchouc, sont les principales causes de l'augmentation de la teneur en air occlus du béton incorporant ce type de granulats [Fed96]. Najim et al., ont montré que la teneur en air occlus des bétons contenant des granulats de caoutchouc est élevée et qu'ils sont faciles à pomper [Naj10]. Skripkiunas et al., ont signalé eux aussi, que la porosité de la matrice et sa teneur en air occlus sont considérables lors de l'emploi des granulats de caoutchouc de petites tailles [Skr10].

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

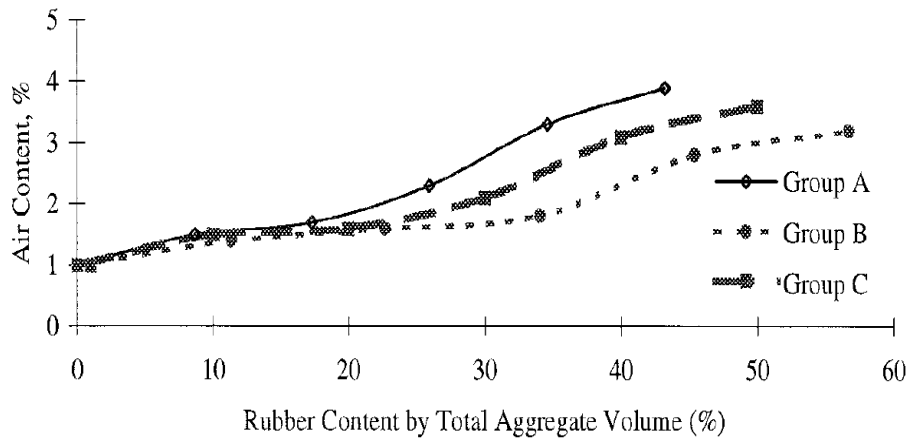


Figure 1.12 Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus [Kha99].

1.11.2 Propriétés des bétons caoutchoutés à l'état durci

La documentation a fait état de quelques essais réalisés sur des composites cimentaires durcis, contenant des granulats de caoutchouc. Cependant, ces études ne concernent pas que les bétons légers, mais elles permettent de comprendre de façon globale l'influence de l'ajout des granulats de caoutchouc dans un composite cimentaire.

Dans les matériaux cimentaires caoutchoutés, une partie des granulats naturels est remplacée par des granulats de caoutchouc naturel, de forme, de densité et en général de propriétés physiques entièrement différentes de celles des granulats naturels. Selon Mehta et al., les propriétés d'un matériau provient de sa structure interne [Meh94]. Chaque béton ayant une formulation appropriée, est constitué de plusieurs types de matériaux, de tailles, de formes et de qualités différentes, avec une distribution particulière de ces phases, que de toute évidence, il est attendu que ces propriétés vont être influencées par l'ajout d'une matière tel que le caoutchouc ayant ces propres caractéristiques.

Dans l'étude de Toutanji, l'enquête a été faite sur des composites obtenus par remplacement de 25, 50, 75 et 100% des granulats naturels par des granulats grossiers de caoutchouc. Les résultats montrent que la chute de la résistance à la compression, est le double de la chute de la résistance à la flexion, les bétons testés ont montré une ductilité et une grande déformation avant la rupture [Tou96]. Accetti et al., ont étudié des bétons incorporant des granulats de caoutchouc et ont remarqué que ces granulats agissent comme une barrière empêchant le développement des fissures. Pendant le durcissement de la pâte incorporant les granulats de caoutchouc, ces derniers interceptent les micro-fissures et limitent leur progression, en évitant de cette manière, leur apparition prématurée [Acc00].

Biel et al., ont évalué le mode de rupture de bétons, contenant des particules de caoutchouc avec l'ajout d'oxychlorure de magnésium, pour améliorer la liaison entre la pâte de ciment et les particules de caoutchouc (0 à 10mm). Dans ces conditions, les essais de compression, ont montré que la substitution du sable par des particules de caoutchouc à une proportion inférieure à 15%, présente un mode de rupture sous forme d'explosion similaire à celui d'un béton conventionnel. Cependant, lorsque le pourcentage de substitution en particules de caoutchouc augmente, le mode de rupture varie pour passer de l'explosion à une

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

fissuration lente et progressive, proportionnellement à la quantité de substitution [Bie96]. En effet, lorsqu'une charge verticale est appliquée sur une particule de caoutchouc, celle-ci se déforme et engendre la destruction de la liaison pâte de ciment/particules de caoutchouc. Il en résulte, des contraintes de traction au sein de la microstructure du béton pouvant induire une rupture prématurée du béton. Alors que les essais d'écrasement, ont montré que, peu importe si l'on utilise de l'oxychlorure de magnésium ou non, une substitution supérieure à 25% de caoutchouc par rapport au volume de sable, réduisait les résistances à la compression de 90% [Mar00].

Lee et al., ont évalué la résistance à la compression, à la traction et à la flexion et aux impacts de béton au latex avec ajout de particules de caoutchouc. De façon globale, ils ont noté que ces résistances relatives au béton contenant 5% de caoutchouc en remplacement du sable, ont chuté de 21, 23 et 48% respectivement. Alors que les résistances à la compression et à la traction du béton au latex incorporant 5% de granulats de caoutchouc, sont supérieures aux résistances du béton de référence ; tandis que, pour les bétons au latex et au caoutchouc, il a été suggéré de remplacer le latex par 5 % de granulats de caoutchouc pour améliorer la résistance à la compression et à la traction [Lee98].

Kaloush et al., ont montré que malgré la chute de la résistance en traction, la déformation a augmenté suite à l'incorporation des granulats de caoutchouc [Kal05]. Cette capacité de déformation à la rupture, montre que le béton incorporant des granulats de caoutchouc est plus ductile. Une chute de 22% de la résistance à la flexion a été enregistrée, le béton incorporant 30 kg de granulats de caoutchouc par 1m^3 a une ténacité comparable à celle du béton de contrôle [Ho08].

Ghaly et al. Et Valadares, ont examiné dans des études séparées, l'utilisation de différents pourcentages de caoutchouc dans le béton, ils ont remarqué que l'augmentation de la teneur en caoutchouc, entraîne une diminution de résistance à la compression [Gha05; Val09]. Freitas et al. et Ganjian et al., ont mentionné dans leurs études, la même remarque. Ceci a été expliqué par la faible adhérence entre la pâte de ciment et les granulats de caoutchouc [Fre09; Gan09]. Lorsque les gros granulats, sont remplacés par ceux de caoutchouc, la perte en résistance de compression, est beaucoup plus importante par rapport à celle produite lorsque les granulats fins sont remplacés [Aie10]. Par contre Valadares [Val09], a justifié ceci par l'origine de compositions chimiques différentes des déchets pneumatiques utilisés dans chaque cas (voiture, camion ou moto). Dans la recherche de Batayneh et al., il a été conclu que l'utilisation des granulats de caoutchouc, n'est pas appropriée pour des bétons à haute performance, dont des résistances élevées sont exigées [Bat08]. Najim et al., ont utilisé le caoutchouc sous forme de granulats (2 à 6mm) dans des bétons auto-plaçant, en remplacement massique (5, 10 et 15%) partiel des granulats fins ou gros, et un remplacement combiné des deux tailles de granulats. Ils ont conclu, que le remplacement mixte, offre de meilleures résistances à la compression [Naj12].

Mohamed et al., ont utilisé de 0 à 40% de granulats de caoutchouc en remplacement du sable avec de différents types de ciment. Ils ont prouvé dans cette recherche, que l'incorporation de ces granulats dans les mélanges, diminue la résistance à la compression d'environ 59,25%. [Moh15b]. Alors que Guneyisi et al., ont évalué la résistance à la compression des bétons incorporant des granulats de caoutchouc en remplacement des granulats fins et gros à de différents taux. Au cours de cette étude, cette résistance a diminué à 31,0 et 62,8 MPa et ils ont confirmé que l'incorporation de ces granulats, est la cause de cette

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

diminution [Gün16]. Nagesh et al., ont observé que la résistance à la compression a diminué de 40% avec l'augmentation de la teneur en granulats fins de caoutchouc, et de 36% lors du remplacement des granulats fins et gros par 20 et 2,5% de poudrette et de gros granulats de caoutchouc, respectivement. Cela est dû selon ces auteurs, à la faiblesse de l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats de caoutchouc en comparaison avec le sable. Le module d'élasticité, a diminué avec l'augmentation de la teneur en poudrette de caoutchouc et une plus grande déformabilité a été acquise [Nag14].

Goulias et al., ont évalué le comportement d'un béton contenant 20 à 30 % de particules de caoutchouc, dont le diamètre varie de 0 à 10 mm, utilisées en substitution des granulats fins. Les résultats ont montré, que l'incorporation d'une importante quantité de particules de pneus usagés, a pour effet de réduire les modules dynamiques d'élasticité. Ils ont également constaté, une grande déformation avant la rupture complète du béton sous charge. Cette étude a conclu, qu'une substitution de 20% des granulats fins par un volume équivalent de particules de caoutchouc, représente un compromis optimal en ce qui concerne les propriétés du béton [Gou98]. Toutefois, il en ressort de l'utilisation à de forts taux de substitution ou avec modération, les effets sur les principaux paramètres, tels que la résistance à la compression et à la flexion, le module d'Young, le retrait de dessiccation sont néfastes. En revanche, pour des taux de remplacement réduits et en choisissant bien la granulométrie de substitution, les performances sont plus au moins conservées.

Parmi d'autres, les recherches de Garros, ont permis de préciser l'impact du dosage et de la taille des granulats en caoutchouc sur ce paramètre dans le cas des bétons auto-plaçant. Les résultats ont confirmé, que la présence de granulats en caoutchouc est très préjudiciable vis-à-vis la résistance à la compression, une chute jusqu'à 86% est enregistrée pour les composites les plus dosés en cette matière. Dans l'application visée, une résistance en compression minimale de l'ordre de 5 MPa lui a imposé un taux maximal de substitution de 25% [Gar07].

Plusieurs chercheurs, ont confirmé que la taille, la proportion, la texture de la surface des granulats de caoutchouc et le type de ciment, affectent la résistance à la compression. La présence des granulats de caoutchouc grossiers, influencent beaucoup plus ce paramètre. Ces granulats, agissent comme des vides dans les composites cimentaires en raison de leur faible adhérence avec la pâte de ciment, les fissures sont généralement, initiées dans cette zone.

Eldin et al., ont également montré que lorsque les granulats grossiers sont remplacés par la poudrette de caoutchouc, la résistance à la compression est réduite jusqu'au 85% et la résistance à la traction diminue jusqu'au 50% [Eld93]. Des résultats similaires ont été présentés par d'autres chercheurs, tels que Fedroff et al. et Aiello et al., ils ont prouvé que la baisse de la résistance à la compression est considérable lorsque les granulats grossiers sont remplacés par les granulats de caoutchouc, lors de l'emploi des granulats par des granulats de caoutchouc fins à un taux de (50% et 75%), la résistance à la traction a diminué par 5,8% et 7,3% avec un meilleur comportement aux fissurations, alors que cette diminution a été de l'ordre de 28,2%, lors du remplacement par des gros granulats de caoutchouc [Fed96; Aie10].

Khatib et al., ont confirmé qu'il y a une chute de la résistance en compression de 90% entre un béton de référence et un béton incorporant plus de 60% de granulats de caoutchouc [Kha05]. A partir de cette étude, les auteurs ont conseillé de ne pas dépasser un taux de substitution de 20% du volume total de la phase

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

granulaire [Gar07]. La chute de la résistance a été expliquée, par la souplesse des granulats de caoutchouc, agissant en tant que concentrateur de contraintes, provoquant des fissurations dans la matrice du béton conduisant à une perte de résistance [Gan09]. La différence du module d'élasticité du caoutchouc et celui de la pâte du ciment, est aussi l'une des explications avancées dans plusieurs études. La densité de la poudrette de caoutchouc, mesurée au pycnomètre dans la recherche de Topçu et celle de Toutanji, ont prouvé que les bétons incorporant ces granulats, ont un comportement élastique [Top95] [Tou96].

En ce qui concerne la perméabilité, certains auteurs ont montré que la perméabilité à l'air, augmente avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc (figure 1.13) [Gar10].

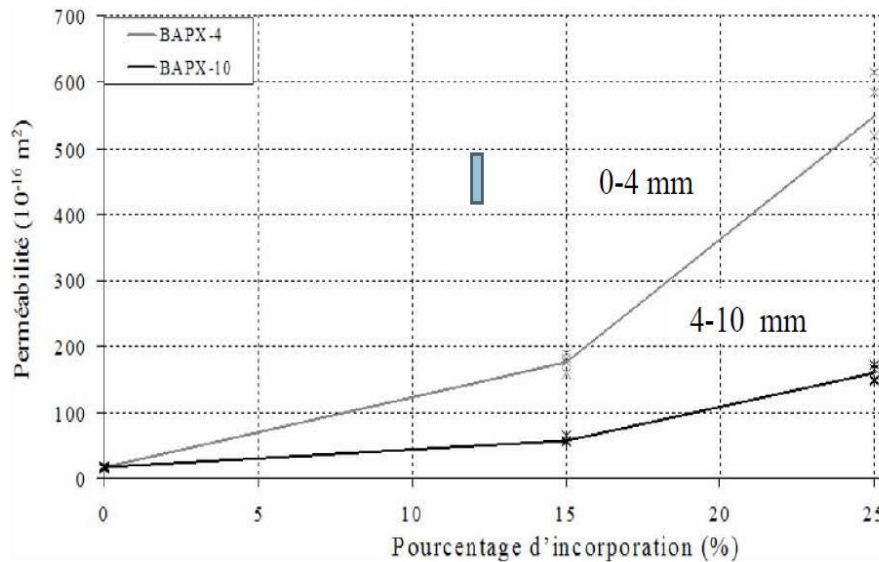


Figure 1.13 Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des granulats de caoutchouc [Gar10]

Garros, lui aussi a travaillé sur les propriétés des bétons auto-plaçant incorporant des granulats de caoutchouc. Il a conclu que, la perméabilité à l'oxygène, augmente avec le taux d'incorporation en granulats de caoutchouc en s'appuyant sur deux hypothèses ; l'augmentation de la porosité avec la présence des granulats de caoutchouc et l'auréole de transition plus étendue et de qualité médiocre avec le défaut d'adhérence du granulat en caoutchouc à la matrice cimentaire [Gar07].

Dans l'étude de Ganjian et al., représentée par les figures 1.14 et 1.15, il a été constaté que les granulats de caoutchouc se trouvant dans les mélanges en remplacement des granulats grossiers, ont provoqué une augmentation de la profondeur de la perméabilité à l'eau ainsi que son absorption, mais ils ont réduit l'absorption d'eau dans le cas où ils remplacent le ciment car la poudrette a occupé les vides entre les granulats [Gan09].

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

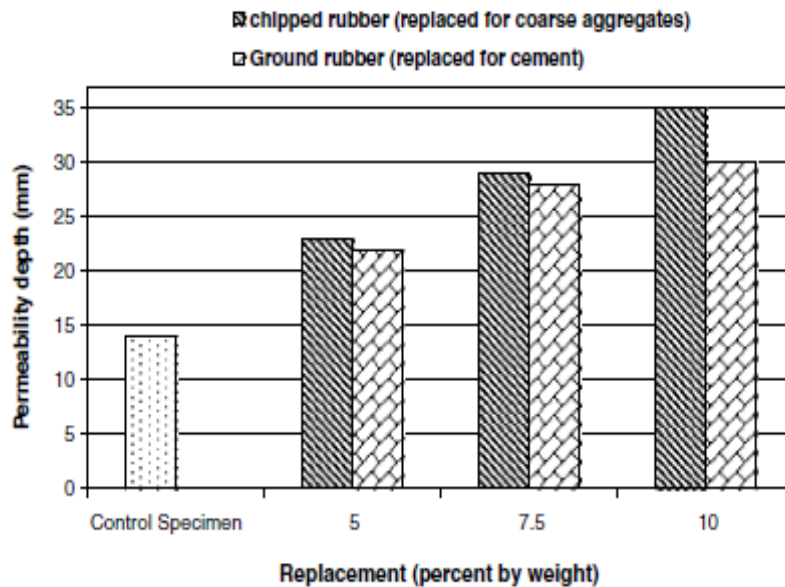


Figure 1.14 Perméabilité à l'eau de béton contenant en fonction du taux de remplacement par des granulats de caoutchouc [Gan09]

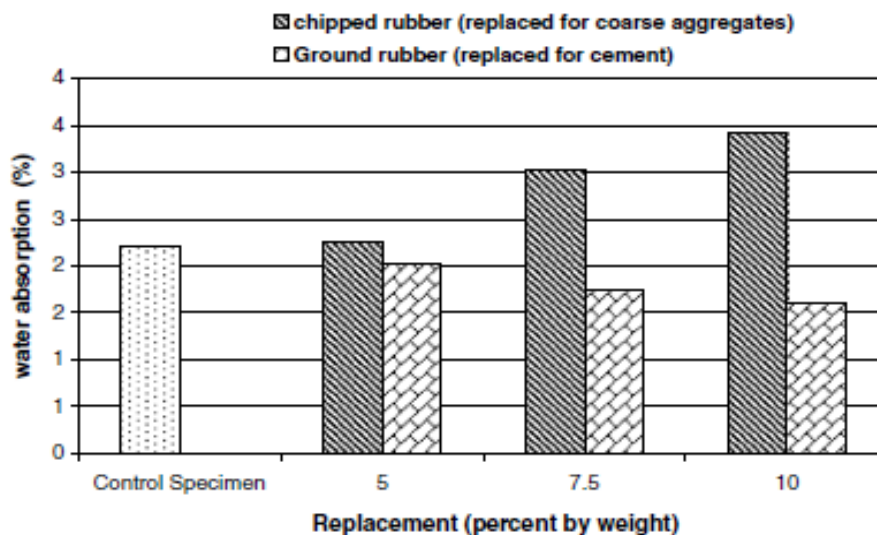


Figure 1.15 Absorption d'eau des bétons en fonction du taux de remplacement par des granulats de caoutchouc [Gan09]

1.11.3 Propriétés thermiques des bétons caoutchoutés

Il est bien connu, que leur nature minéralogique affecte grandement la conductivité thermique du béton, plus la conductivité thermique du granulat est faible, plus faible sera celle du béton confectionné [Nev00]. La conductivité thermique du caoutchouc est relativement faible, elle est du même ordre que celle de la terre crue, soit 0,3 à 0,4 W/m.°C. Les résultats des mesures de la conductivité thermique des bétons légers en particulier, ceux incorporant des granulats de caoutchouc sont rarement trouvés dans la littérature. Dans le travail de recherche, fait par Cuong, dont les résultats sont présentés ci-dessous (figure 1.16), il a été montré que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation du dosage de granulats de caoutchouc [Ho10]. En effet, le caoutchouc représente une structure amorphe et sa conductivité thermique d'environ 0,4

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

W/m.°C, est faible par rapport à celle des granulats naturels qui représentent une structure cristalline et une conductivité thermique généralement supérieure à 1,5 W/m.°C [Ho10].

La porosité du composite cimentaire, est plus importante en présence des granulats de caoutchouc. L'air ayant une conductivité thermique beaucoup plus faible (0,023 W/m.oC) remplit les pores du béton et limite la conduction de la chaleur. Dans de nombreux travaux de recherches tels que ceux de Gul et al., Blanco et al., Demirboga et al. et Sukasukkul et al., il a été signalé que la conductivité thermique du béton diminue avec la réduction de sa densité. Cette conclusion a été étendue aux bétons incorporant des granulats de caoutchouc, puisque la chute de la densité n'est pas seulement due à l'augmentation de la porosité, mais aussi à la faible densité du caoutchouc.

Ce paramètre est inversement proportionnel à la densité du matériau. Les mélanges contenant du caoutchouc ont une plus faible densité, donc ils fournissent une conductivité thermique inférieure [Gul97; Bla00; Dem03; Suk09]. Paine et al., dans leur étude, ont rapporté que l'inclusion de caoutchouc dans le béton en remplacement du sable naturel a diminué sa conductivité thermique [Pai12]. La conductivité thermique diminue lorsque le taux d'incorporation en granulats de caoutchouc augmente, avec les conséquences qui peuvent en découler, notamment un gradient de déformation d'origine thermique et un risque de fissuration d'élément à grande surface [Ho10].

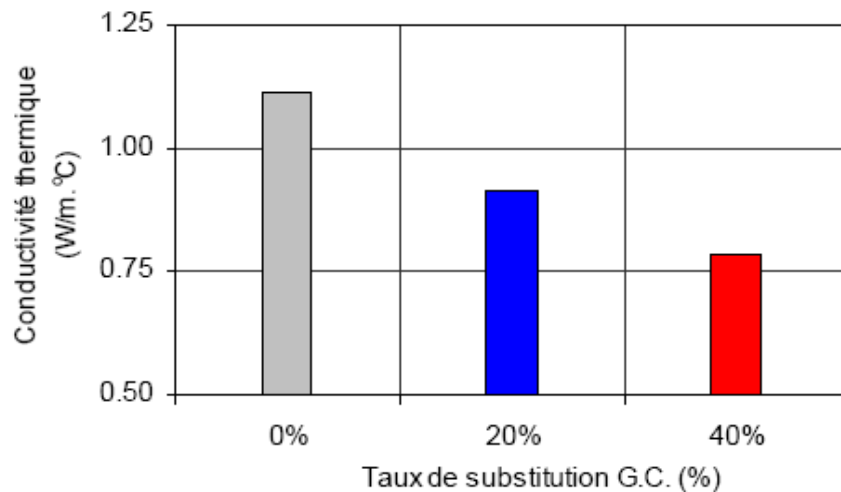


Figure 1.16 Influence du dosage en granulats de caoutchouc sur la conductivité thermique [Ho10].

Pelisser et al., ont rapporté une réduction de 13,8% de la conductivité thermique du mortier contenant de caoutchouc de pneus recyclés (taille maximale de 2,4 mm) en tant que remplacement de 40% du volume du sable naturel, par rapport à béton de control [Pel12]. Si on prend en considération la taille des granulats, inclus dans la composition des composites cimentaires caoutchoutés, en prenant le cas de l'étude de Fadiel et al., qui ont constaté une diminution de l'ordre de 13,1%, 15,2%, 17% et 21,2% de la conductivité thermique des mortier incorporant 10%, 20%, 30% à 40% de poudre de caoutchouc (taille $\leq 0,6$), respectivement, remplaçant le même poids du sable naturel, et une réduction de l'ordre de 18,2%, 24,6%, 26% et 27,8% de la conductivité thermique, suite à l'inclusion des mêmes quantités de poudre de caoutchouc respectivement (grosseur 0,84 à 0,2mm), on peut dire aussi, que la taille des granulats de caoutchouc est l'un des facteurs affectant ce paramètre [Fad14].

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

La réduction de la conductivité thermique de la matrice caoutchoutée peut être attribuée en partie à l'augmentation de piégeage de l'air provoquée par les particules de caoutchouc hydrophobe, pendant le mélange et en partie à la faible conductivité thermique de la poudrette de caoutchouc. Benazzouk a montré, que l'air entraîné lors du malaxage, conduit à une porosité fermée dans la matrice cimentaire, ce qui améliore les performances d'isolation thermique du composite cimentaire, modifiées par des granulats de caoutchouc [Ben02a].

Des tests d'isolation thermique, ont été effectués sur des échantillons contenant la poudrette de caoutchouc à une chaleur constante de 700°C par Nagesh et al., les résultats ont montré l'augmentations d'isolation thermique avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc fin, suite à faible densité et conductivité thermique, comparèrent au sable [Nag14]. D'après la littérature, l'augmentation de l'isolation thermique des composites cimentaires suite à l'incorporation des granulats de caoutchouc, est avantageuse pour le domaine de la construction nécessitant cette qualité.

1.11.4 Propriétés acoustiques des bétons caoutchoutés

Le caoutchouc est l'un des matériaux les plus couramment utilisés pour l'isolation vibratoire. Le potentiel des bétons incorporant cette matière pour amortir des ondes acoustiques, est souvent évoqué pour les applications antibruit. Malgré cela, la littérature scientifique révèle qu'il y a peu de certitude, compte tenu des résultats rares notamment sur l'effet des granulats de caoutchouc sur l'absorption acoustique du béton léger.

Plusieurs auteurs, ont indiqué que l'accroissement de la surface spécifique des pores dû aux granulats de recyclage augmente le coefficient d'absorption acoustique du matériau. Veronique, a indiqué que le changement du système de la porosité ouverte du matériau telle que la dimension des pores ou l'inter-connectivité poreuse, est une hypothèse pertinente, pour l'amélioration des propriétés acoustiques des composites cimentaires [Ver05]. Autres chercheurs, ont indiqué qu'une meilleure absorption acoustique, a été attribuée aux bétons contenant du caoutchouc, par rapport au béton classique, à savoir Sukontasukkul, il a remplacé partiellement le sable dans les bétons par la poudrette de caoutchouc à de différentes taux; 0%, 10%, 20% et 30% en volume. Les résultats ont montré une amélioration des propriétés acoustiques et un accroissement du coefficient de réduction du bruit, lorsque la teneur en caoutchouc a été élevée [Suk09]. La présence des granulats de caoutchouc, améliore le comportement d'amortissement des composites cimentaires, ceci, a été prouvé dans les études de Najim et al. et Eiras et al. Ces auteurs, ont étudiés des bétons et des mortiers, incorporant jusqu'à 15%, 15%, 40% et 60% de granulats de caoutchouc, respectivement. Les résultats ont été justifiés par l'augmentation de la teneur en caoutchouc [Naj12; Eir14].

A travers les différents documents et exemples disponibles dans la littérature, les granulats en caoutchouc au béton, ont pu constituer une solution pour concevoir des composites cimentaires, offrant de meilleures performances. Malgré la chute des résistances mécaniques à la compression et à la traction. Cependant, cette baisse, doit être considérée comme bénéfique dans l'optique d'un composite cimentaire avec une plus importante déformabilité. Holmes et al., ont montré que le béton contenant les granulats de caoutchouc absorbe le son mieux qu'un béton ordinaire dans un milieu à basse, normal ou haute température [Hol14], Pacheco-Torgal et al., ont démontré aussi que le béton caoutchouté est un absorbeur efficace du son et de l'énergie des secousses [Pac12].

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

La mise en œuvre de caoutchouc recyclé pour l'application acoustique a un grand intérêt car, la poudrette de caoutchouc a un bon coefficient d'absorption [Har14]. Rashad a conclu dans son rapport qui porté sur plusieurs études de plusieurs années passées, basées sur l'étude des effets du recyclage de caoutchouc employés en remplacement des granulats naturels dans les matériaux cimentaires conventionnels, que le caoutchouc peut être utilisé comme des barrières sonores, comme un absorbeur de son; dans la construction de la route comme un absorbeur de choc, dans les bâtiments comme un absorbeur d'ondes sismiques et de choc, comme un matériau de construction, vue ces propriétés correspondantes à ces fonctions [Ras15].

1.11.5 Durabilité des composites cimentaires caoutchoutés

Les études liées aux propriétés de durabilité du béton contenant les granulats de caoutchouc recyclés, sont peu abondants. La section suivante traite ce sujet en couvrant les différents effets des conditions agressives, pouvant être préjudiciables pour les composites cimentaires caoutchoutés à court et à long terme.

1.11.5.1 Durabilité de l'interface béton/granulats de caoutchouc

La qualité d'interface pate/granulat est dépendante des caractéristiques de la surface des granulats et de la pate de ciment hydratée. Selon Countinho, la liaison entre granulats et la pate de ciment, se produit à cause de la rugosité de la surface du granulat, leurs propriétés électrostatiques et les propriétés chimiques du ciment, la connexion entre pate/granulats se fait quand l'ensemble absorbe l'eau contenant une partie du ciment qui se cristallise dans l'agrégat en même temps que le liant en les reliant, il y a plusieurs types de connexion pate/ciment: la connexion macroscopique due à la rugosité de la surface des granulats, dont les cristaux provenant de l'hydratation du ciment [Cou99].

Afin de contribuer, à l'élaboration de composites cimentaires durables incorporant, des granulats de caoutchouc en remplacement d'une proportion de granulats naturels, plusieurs recherches ont été lancées dans de différents axes d'études, afin de contribuer à l'amélioration de ce contact entre granulats naturels et un autre artificiel. Certaines de ces études, ont confirmé que les particules de caoutchouc peuvent se détacher de la matrice, ce qui entraîne une séparation complète des spécimens fissurés [Rag98]. Cette faible adhérence entre caoutchouc et matrice cimentaire diminue sa performance mécanique et par conséquent sa durabilité, ce qui contribue significativement à l'augmentation de la porosité globale du composite cimentaire. Toute solution permettant d'améliorer cette adhérence, peut être, à priori considérée comme étant en faveur de la durabilité. Vis-à-vis propriétés mécaniques, compte tenu de la différence entre les coefficients de poisson des matériaux en contact, l'impact de cette adhérence est discutable.

D'autres recherches, se font dans le but de remédier à ce problème afin de favoriser cette liaison, en effectuant des traitements de surface par utilisation d'agent de collage concentré à l'interface pour assurer la continuité physique de ces deux matériaux. Pour promouvoir une adhérence épitaxiale, entre granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire, le Coating a été employé pour remédier à la compatibilité du Latex de caoutchouc modifié avec le béton, toutefois, l'inconvénient de ceci, est dans le fait de probabilité de l'existence de substances issues de la coagulation du Latex naturel [Tur08].

Ainsi, il a été démontré que l'ajout de l'alcool de polyvinyle augmente l'adhérence entre granulats ordinaires et matrice, en espérant qu'il fera autant avec le granulat de caoutchouc et pouvoir bénéficier de cet effet,

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

l'importance de la cohésion qui peut exister entre cet agent et le granulat de caoutchouc en mode de traitement de surface reste à étudier [Jae99]. Segre et al., ont utilisé une solution alcaline (NaOH) pour traiter la surface de granulat en caoutchouc dans le but d'améliorer sa capacité, d'attirer et de retenir l'eau [Seg00]. Les observations au microscope électrique, ont permis de montrer une meilleure adhérence entre la pâte de ciment et les granulats de caoutchouc traités à la soude. Albano et al., ont aussi traité les granulats de caoutchouc avec une solution de NaOH et ont utilisé du Silane (A-174) comme adjuvant. Ils ont constaté, que ces mesures n'avaient pas d'influence visible sur les résistances en compression et en traction et qu'elles n'ont pas d'effet sur l'adhérence entre le granulat en caoutchouc et la matrice cimentaire [Alb05]. D'autres solutions, déjà testées, en vue de promouvoir l'adhérence des composants des composites cimentaires caoutchoutés, en gardant toujours les mêmes performances mécaniques ou même les augmentées, les produits dérivés de polymère et de résine semblent efficaces, deux agents sont privilégiés en matière d'adhérence: polymère acrylique de styrène sous forme d'émulsion laiteuse et la résine époxy possédant de bons indicateurs de performance et de durabilité.

Li et al. a traité les granulats par une solution d'Ether de Cellulose Methocel, la résistance à la compression du béton caoutchouté, a augmenté ainsi que la flexibilité, la ductilité et la capacité d'absorption de l'énergie, cette méthode de traitement a été jugée pratique [Li98]. Biel et al., ont utilisé le Magnésium Oxy-Chlorure pour améliorer la qualité d'interface pate/granulats de caoutchouc, une augmentation des résistances à la traction et à la compression, a été enregistrée par rapport à un béton contenant des granulats de caoutchouc sans traitement [Bie96].

Le soufre organique a amélioré la liaison entre les granulats de caoutchouc/composés C-S-H, cette méthode, est économique et facile à adopter [Cho10]. Dans d'autres recherches, de divers acides chimiques, ont été employés pour le même but, tels que le H_2SO_4 , HNO_3 et HCl . Le traitement avec l'acide sulfurique et l'acide nitrique rend la surface du caoutchouc rugueuse et adapté pour la liaison avec la pate du ciment, alors que l'acide perchlorique n'a pas affecté le caoutchouc. Le H_2SO_4 s'est montré prometteur en produisant une plus grande augmentation de la porosité et la rugosité de la surface du caoutchouc [Col07]. Autres matériaux ont été étudiés pour la même raison, n'ont pas été mis en œuvre, tel que le W564 de la famille du copolymère acrylique, malgré les performances mécaniques qu'il a prouvées. L'évaluation de l'efficacité des solutions étudiées, se fait à travers la mesure d'indicateurs de durabilité, à savoir la porosité, la perméabilité, l'absorption de l'eau la carbonatation et la résistance au gel dégel [Onj12].

1.11.5.2 Résistance au feu

Quant à la résistance au feu, peu d'études sont réalisées sur des bétons incorporant des granulats de caoutchouc, cette propriété laisse penser que l'ajout de cette matière est favorable à la résistance au feu du composite cimentaire. Hernández-Olivares et al. et Guneyei et al., ont essayé d'évaluer la résistance au feu du Béton à haute performance incorporant des granulats de caoutchouc en le plaçant dans des fourneaux à des températures dépassant 1000°C. Ces auteurs ont observé que les éprouvettes du béton témoin, présentent plus d'écaillés à leur surface exposée au feu ainsi que des déformations d'allure clairement apparente par rapport à celle des éprouvettes en incorporant des granulats de caoutchouc. En effet, ces granulats au sein du composite sont brûlés d'où la formation de trous servant de vases de décompression à la vapeur d'eau interne et la diminution de la contrainte due à la pression de vapeur par la suite [Her04, Gun04].

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

Ainsi, ils ont observé qu'à l'intérieur des éprouvettes et à la même profondeur, la température est plus faible si on augmente le dosage des granulats en caoutchouc. Donc, l'épaisseur demandée de la couche d'enrobage des colonnes en BHP de référence, est plus importante par rapport à celle en Béton à haute performance caoutchoutés en vue de garantir l'intégrité structurale [Ho10]. Akasaki et al., ont évalué les performances mécaniques du béton mélangé avec des granulats de caoutchouc recyclé, chauffée en deux étapes à une température de 600°C, conformément à la courbe ISO 834, la première, à partir de 105°C/min jusqu'à 538°C et la seconde à partir de 33°C/min jusqu'à la température ciblée (600°C). Les auteurs ont conclu, que l'introduction du caoutchouc n'affecte pas de façon significative la résistance à la compression, étant donné que les valeurs maximales de chute enregistrée a été de 70% pour les échantillons de béton contenant des granulats de caoutchouc recyclé et de 64% pour le béton de contrôle [Aka06].

Marques et al., ont étudié l'effet des hautes températures sur des bétons incorporant 5, 10 et 15% du volume des granulats de caoutchouc fin et grossier à la fois. Exposés à l'âge de 115 jours à 400, 600 et 800°C, puis soumis à des tests mécaniques pour évaluer la résistance à la compression et à la traction. Entre 400 et 600°C, la perte de performance pour le béton caoutchouté a été à peu près semblable à celle du béton normal, sauf celui contenant 15% de caoutchouc qui a subi une perte plus forte à 600 et 800°C, suite à la décomposition des granulats de caoutchouc, à cette température élevée, la perte à la résistance à la traction a été plus considérable pour les bétons caoutchoutés. Ces auteurs ont conclu à la fin, qu'après cette exposition thermique que la réduction de performances de béton caoutchouté n'empêche pas son utilisation dans des applications structurelles, à condition que le remplacement des granulats naturels par ceux de caoutchouc, soit à un taux plus au moins faible [Mar13].

Guo et al., ont étudié des bétons obtenus par remplaçant partiel du sable naturel à des volume de l'ordre de 4%, 8%, 14% et 16% par des petits morceaux de caoutchouc (1,4 à 0,85 mm). Ils ont constaté, une diminution de la résistance à la compression et du module de Young de bétons avec l'augmentation de la teneur en sable en caoutchouc, et ce, après leur exposition au feu à 200, 400 et 600°C pendant deux heures [Guo14]. L'inclusion du caoutchouc a prouvé dans la majorité des recherches son efficacité en termes de réduction des microfissures dans les composites cimentaires exposées au feu à des températures élevées. Ce matériau a permis de retarder le déclenchement des fissures dans le béton sous l'effet des températures élevées. Ainsi, 'une quantité appropriée de granulats de caoutchouc dans le béton a amélioré sa capacité d'absorption d'énergie (ténacité) après une exposition à des températures élevées [Ras16].

1.11.5.3 Résistance au gel-dégel

L'étude de la résistance au gel-dégel du béton est un facteur essentiel, pour prédire la tenue des composites cimentaires dans le temps froid. Plusieurs études antérieures tels que celle de Paine et al., ont signalé l'amélioration de la résistance au gel-dégel suite à l'ajout de poudre de caoutchouc dans le béton [Pai12], Turgut et al., ont constaté une résistance plus élevée relative aux blocs de béton incorporant entre 10% et 70% du volume de poudre de caoutchouc (taille de 4,75 à 0,075 mm) en remplacement de sable naturel [Tur08b]. Pedro et al., ont testé sous vieillissement accéléré pendant 112 jours, des mortiers contenant 15% de granulats de caoutchouc (taille de 4,75 à 0,15mm) en remplacement partiel du même volume du sable naturel. Ils ont constaté que les mortiers caoutchoutés sont moins sensibles aux gel-dégel que ceux de contrôle [Ped13].

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

La résistance au gel/dégel augmente avec la teneur en poudrette de caoutchouc en raison de l'incorporation d'air dans la matrice provoquée par l'ajout de caoutchouc. Les mêmes constatations ont été rapportées par Al-Akhras et al., ont étudié des mortiers contenant des cendres en caoutchouc (taille 0,15 mm) en remplacement d'un poids de l'ordre de 5% à 10% du poids du sable naturel [Akh04]. L'augmentation de la teneur en sable de cendres en caoutchouc conduit à une augmentation de la résistance au gel/dégel par rapport à des échantillons sans caoutchouc.

La taille des granulats de caoutchouc est toujours en relation directe avec tous les indicateurs de performance et de durabilité des composites cimentaires. Elle a une influence remarquable sur résistance au gel-dégel. La poudrette de caoutchouc a été signalée pour son rôle dans la minimisation des effets des cycles de gel-dégel par rapport aux granulats de caoutchouc grossiers [Rag98; Zhu12; Sav96]. Ainsi, les granulats de caoutchouc expansés ont montré de meilleures performances que les granulats de caoutchouc compact [Ben02]. Une autre étude a confirmé que le caoutchouc granulaire à le pouvoir d'un adjuvant entraîneur d'air et par conséquent, améliore la résistance au gel-dégel [Pai02].

Karahan et al., ont remplacé 0%, 10%, 20% et 30% du volume du sable naturel avec des granulats de caoutchouc (taille de 4,75 à 0,15 mm), ils ont exposé les composites résultants à 300 cycles de gel/dégel. Les résultats obtenus ont montré une légère diminution de la résistance à la flexion après de 6,78% et 5,56%, avec l'inclusion de 0% et de poudrette de caoutchouc, respectivement. L'inclusion de 20% et 30% de poudrette de caoutchouc a produit une réduction significative de cette résistance (12,5% et 13,16% correspondants aux 20% et 30% de caoutchouc, respectivement. Ils ont fournis aussi, des résultats relatifs au module d'élasticité dynamique des bétons contenant la cendre de caoutchouc soumis aux cycles de gel-dégel. A 5% et 10% de cendres de caoutchouc, 55% et 60%, respectivement, de ce module sont atteints après 150 et 225 cycles, alors que les bétons de contrôle ont atteint 55% module d'élasticité dynamique en seulement 50 cycles [Kar12]. Dans une autre étude, faite par Salamah, il a été constaté qu'une augmentation de la teneur en caoutchouc dans la matrice augmente la résistance au gel-dégel de béton. Il a également observé, que tous les échantillons ont survécu jusqu'au nombre maximal de cycles (300) et le module d'élasticité était supérieur à 60% [Sal16].

1.11.5.4 Résistance aux environnements agressifs

Les acides préoccupent à ce jour, plusieurs chercheurs du domaine d'utilisation des déchets dans le génie civil. En ce qui concerne les composites cimentaires caoutchoutés, les résultats des études avancées aux sujets de leur durabilité aux acides, ont encouragé l'intégration de ce matériau sous forme de plusieurs proportions dans de différentes applications de construction. Segre et al., ont évalué la durabilité du mortier contenant de caoutchouc (taille 0,2 mm) remplaçant 10% du poids total du sable. Leur exposition pendant 6 jours à une solution d'acide de HCl de 5%, a montré une amélioration de leur résistance par rapport au mortier de contrôle [Seg04]. Topcu et al., ont substitué 10%, 20%, 30% et 40%, du volume du sable et l'ont remplacé par la poudrette de caoutchouc (taille 1 à 0 mm ou 4 à 1 mm). Ils ont simulé l'effet de l'eau de mer par une solution de NaCl et ont fait durcir des échantillons dans cette solution, et d'autre ont subi un durcissement normal. Suite à ces expériences et en présence des granulats de caoutchouc, le module d'élasticité dynamique a baissé par 35%, 50%, 60% et 74% pour l'inclusion de 10%, 20%, 30% et 40% de caoutchouc (taille \leq 1mm), respectivement, alors qu'il a baissé par 20%, 31%, 50% et 63%, respectivement, avec l'inclusion de la poudrette de caoutchouc ayant une taille de particule de (taille 1 à 4 mm) [Top07].

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

Azevedo et al., ont étudié l'attaque de l'acide sulfurique à des bétons contenant le caoutchouc remplaçant 0%, 5%, 10% et 15% du poids du sable. A l'âge de 56, ces bétons ont été exposés à de l'acide sulfurique pendant une période de 28 jours. Les résultats ont montré que l'augmentation de perte de masse est relative à l'augmentation de la teneur en caoutchouc [Aze12]. Ganesan et al., eux aussi ont évalué la perte de masse due à l'attaque par acide sulfurique par mesure de perte de masse. Les bétons étudiés contenant 15% de poudrette de caoutchouc (tailles < 4,75 mm), exposés à l'eau de mer ou la solution d'acide (H₂SO₄) pendant 90 jours ont subi une perte de masse inférieure à celle du béton de contrôle [Gan12].

1.11.5.5 Résistance à l'abrasion

Dans plusieurs rapports de recherche, il a été prouvé que la teneur des composites cimentaires en granulats de caoutchouc et la taille de ces derniers sont les éléments décisifs de la qualité de la résistance à l'abrasion. Ainsi d'après plusieurs de ces études, des contradictions ont été soulignées concernant les effets du caoutchouc de caoutchouc sur la résistance à l'abrasion [RAS16].

Parmi les premières hypothèses, suivant lesquelles les études de la résistance à l'abrasion des composites cimentaires caoutchoutés a été évaluée, la qualité des surfaces de granulats de caoutchouc inclus dans ces composites. Segre et al., ont utilisé granulats de caoutchouc traité et non traité par le NaOH. Les résultats obtenus ont montré que l'usure est relative au nombre de cycle de l'abrasion. Cette usure est plus significative en présence des granulats de caoutchouc non traités ayant une meilleure adhésion à la pâte de ciment [Seg00]. Dans la recherche de Ozbay et al., où le volume de sable naturel a été remplacé partiellement avec des granulats de caoutchouc à raison en volume, il a été montré que la diminution de la résistance à l'abrasion des bétons est relative avec l'augmentation la teneur en caoutchouc. L'inclusion de 5%, 15% et 25% de caoutchouc a augmenté la profondeur de l'usure d'environ 11,59%, 17,39% et 23,19%, respectivement [Ozb11]. Valadares et al., eux aussi ont remplacé le sable naturel des bétons par des volumes plus importants de granulats de caoutchouc (12,5%, 24,15% et 35,77%), ils ont constaté la résistance à l'abrasion augmente avec la teneur en caoutchouc. La profondeur de l'usure par abrasion du béton de contrôle est de l'ordre de 2,6 mm, alors qu'elle est de d'environ 2,0, 1,5 et 1,1 mm pour les bétons incorporant du caoutchouc à raison des taux cités ci-dessus respectivement [Val12].

Dans l'étude de Ganesan et al., on se retrouve avec une augmentation de 20% de la résistance à l'abrasion lors de l'incorporation de 15% de granulats de caoutchouc en remplacement partiel du sable naturel [Gan12]. Thomas et al., ont travaillé sur trois facteurs pour tester la résistance à l'abrasion des bétons de leur étude; le rapport E/C, la taille et la teneur en caoutchouc en remplacement du sable naturel. Les bétons caoutchoutés ont présenté une meilleure résistance à l'abrasion que le béton de contrôle à un rapport E/C entre de 0,4 et 0,5. Alors qu'à un rapport de l'ordre de 0,45 et un taux de 7,5% de granulats de caoutchouc, la résistance à l'abrasion a diminué et a été meilleure à un taux d'incorporation de caoutchouc supérieur à 5% [Tho14]. Ces résultats convergent vers les résultats se trouvant dans la recherche de Grdic et al. où il a été prouvé, une augmentation de la résistance à l'abrasion du béton en remplaçant partiellement 10% du sable naturel avec la poudrette de caoutchouc (0,5 à 4mm) et a démontré la limitation de l'incorporation de la poudrette de caoutchouc à 20%, puisque un taux plus élevé provoque une diminution de l'ordre de 30% de la résistance à l'abrasion [Grd14].

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

1.11.5.6 Résistance à la carbonatation

La carbonatation est parmi les plus importants facteurs de durabilité du béton, les formulations de béton sont qualifiées à ce jour à partir d'expérience de carbonatation. Cette dernière, consiste en l'action du CO₂ de l'atmosphère qui diffuse dans les pores du béton et se dissout en acide en contact avec la solution interstitielle, ce qui conduit à la dissolution des hydrates notamment de la portlandite (réserve de basicité) [Thi05].

Les études menées s'articulent généralement sur des essais de vieillissement sur des corps d'épreuves et également sur des ouvrages réels. L'essai le plus simple qui peut détecter la profondeur de carbonatation d'un béton correspond au test à la phénolphthaléine réalisé sur des fractures fraîches de béton. La phénolphthaléine est un indicateur de pH coloré dont le virage se situe aux alentours de 9. Cela permet de différencier la zone carbonatée (pH < 9) qui reste incolore, de la zone non carbonatée (pH > 9 et allant jusqu'à 13) colorée en violet [Dur08].

En ce qui concerne, les composites cimentaires caoutchoutés, peu de recherches sont parus, au sujet des éléments principaux relatifs à la favorisation de leur carbonatation, ainsi que les diagnostics et les recommandations pour la durabilité de ces composites face à ce phénomène. Bravo et al., ont étudié des bétons contenant la poudrette de caoutchouc remplaçant partiellement certain volume du sable naturel à raison de 5%, 10% et 15%. Ils ont constaté une légère augmentation de la profondeur carbonatée, et par conséquent une diminution de la résistance à la carbonatation, ceci a été relatif à l'augmentation de la teneur en poudrette de caoutchouc et qui est due essentiellement à la qualité de la zone entre la poudrette de caoutchouc et la pâte de ciment [Bra12]. Cependant, d'un tel résultat, il a été conclu, que ces bétons feront le sujet du retrait de séchage, engendrant par conséquent, une augmentation du risque de fissuration et une réduction de l'alcalinité du béton. Ceci peut avoir aussi, des conséquences sur l'impact d'un environnement agressif, puisque la résistance vis-à-vis de la carbonatation, dépendent de l'état de la structure du matériau [Ben07].

1.11.5.7 Résistance à la corrosion

Ce qui est remarqué dans la littérature, le manque des recherches qui ont traité le sujet de la corrosion, peu d'entre une centaine d'étude, ont développé la quantification des indicateurs associés à la corrosion des aciers par l'action des chlorures dans les composites cimentaires caoutchoutés.

Ceci est dû surtout, au fait que l'élaboration de ces composites est destinée dans presque la totalité de ces études, à des applications non structurales. Karahan et al., ont établi une étude dans laquelle, il ont fait une comparaison entre des bétons contenant 10% de poudrette de caoutchouc (taille de 4,75 à 0,15 mm) en remplacement de sable naturel, en volume et des bétons sans caoutchouc. Ils ont conclu que l'état des barres d'armature utilisées dans les deux cas, étaient presque les mêmes [Kar12]. A une teneur de 30% de granulats de caoutchouc, la perte de masse de la barre d'armature du béton caoutchouté été d'environ deux fois de plus par rapport à celle du béton de control. D'autres chercheurs, ont rapporté que le remplacement d'un volume de l'ordre de 5% du sable naturel dans les bétons par des granulats de caoutchouc (taille de 0,6 ou 0,3 mm, crée d'avantage de la résistance à la corrosion (anti-sulfate) [Yun13].

1.11.5.8 Résistance à la pénétration des chlorures

Il n'existe pas de relation entre la résistance aux chlorures et les autres paramètres du matériau, par exemple le rapport E/C, la porosité, la résistance à la compression, ceci, est valable pour tous les types de bétons. Les

CHAPITRE 01 : Revue de la littérature sur les composites cimentaires caoutchoutés.

paramètres du matériau fournissent uniquement des indications approximatives. Pour les bétons aux ciments portland (ciment Portland avec cendres volantes, laitier ou fumée de silice), il convient de mesurer la résistance aux chlorures à un âge plus avancé (par exemple après 90 jours). Cette résistance s'améliore de manière positive avec l'âge du béton [Hun02].

Les chlorures peuvent être présent dans les composantes du béton (particulièrement l'eau et sable), d'où la limitation de la présence de cet élément est indispensable. Contrairement à la carbonatation qui pénètre en phase gazeuse (par CO₂), les chlorures peuvent pénétrer dans le béton sous forme ionique en phase liquide, par diffusion si le béton est saturé ou par absorption capillaire si la surface est sèche [Dos08].

De nombreuses études, ont été développées pour comprendre les phénomènes de transport des chlorures, afin de prédire la durabilité potentielle de ces composites. Un rapport de travaux antérieurs est présenté ci-dessous en fonction de convergence des résultats.

Gesoglu et al., ont étudié des bétons contenant des granulats de caoutchouc en remplacement de 5 %, 15% et 25% du volume total des granulats naturels fins et gros. Une augmentation de la profondeur de pénétration des chlorures a été constaté lors de l'augmentation de la teneur en caoutchouc [Ges07]. Gesoglu et al., ont remplacé 0%, 5%, 15% et 25% du volume des granulats naturels par des granulats de caoutchouc (taille < 4mm). Les résultats montrent que la perméabilité à l'ion chlorure a augmenté avec l'incorporation de poudrette de caoutchouc à une teneur entre 0% à 25% [Ges11]. Bravo et al., ont aboutit aux mêmes constatations, lorsque ils ont étudié des bétons incorporant 5%, 10% et 15% de poudrette de caoutchouc en remplacement du même volume du sable. L'inclusion d'un volume de 5% de caoutchouc a produit une réduction de la diffusion des chlorures, alors que l'augmentation de cette dernière s'est produite à un taux de remplacement de 5% à 15% [Bra12]. Dans la recherche élaborée par Ling, il a été conclu que la profondeur de pénétration des ions chlorure a augmenté avec l'augmentation de la teneur en sable en caoutchouc suite au mécanisme de remplissage adopté par ce chercheur (compression de 10% des granulats de caoutchouc pour remplir les vides afin de les réduire) [Lin12]. Dans un autre travail, la poudrette de caoutchouc a été ajoutée à 0%, 10%, 15% et 20% du volume de sable entre temps la fumée de silice a été ajoutée à 10% en poids du ciment. Pour étudier entre autres l'effet de la poudrette de caoutchouc sur la résistance aux chlorures. Les caractéristiques de transport de chlorure ont été améliorées en augmentant la quantité de poudrette de caoutchouc dans un béton ayant un rapport E/C (0,35), a donné une résistance à l'ion chlorure supérieure de 50% de celle obtenue dans un béton à un rapport à E/C (0,50) [Nur15].

D'autre part, plusieurs chercheurs ont prouvé l'inverse de ces résultats, Oikonomou a évalué la résistance aux chlorure de mortiers contenant 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5% et 15% de caoutchouc (taille de 1,18 à 0,75 mm), en remplacement partiel du sable, il a constaté une diminution jusqu'à 35,85% de la profondeur de pénétration des ions chlorure, correspondant à 15% de substitution [Oik09]. Gesoglu et al., ont utilisé du caoutchouc (tailles 4 à 2 mm) en remplacement de 10% à 20% des granulats naturels dans des bétons. Ces pourcentages de substitution ont réduit le coefficient de perméabilité, par 43,75% et 67,46%, respectivement pour les granulats de caoutchouc de 4mm et par 40,73% et 43,1% lors de l'inclusion de sable de caoutchouc ayant une taille de particule de 2 mm [Ges14].

1.12. Conclusion

Malgré qu'il à été prouvé que les granulats de caoutchouc affectent les propriétés mécaniques des composites cimentaires, plusieurs recherches sont en cours, pour optimiser le dosage et la taille de ces granulats, pour avoir un effet moins sur les propriétés de base de ces matériaux. Dans la littérature, les bétons caoutchoutés en général, possèdent des propriétés séduisantes pour divers applications de construction, dans de divers projets structurels et géotechniques, telles que la faible densité, dureté et ductilité élevées, une importante résistance aux chocs et une efficace isolation thermique par rapport aux bétons classiques. Ces propriétés sont influencées par le taux d'inclusion de caoutchouc.

Les enquêtes sur les déchets de caoutchouc en béton montrent que ces performances sont très dépendantes des granulats de caoutchouc utilisés. La préoccupation des professionnels est de plus en plus tournée vers l'usage de ce matériau de qualité, innovant et prometteur d'être respectueux de l'homme et ayant des impacts environnementaux optimisés. Ces matériaux souvent abandonnés, font l'objet de plusieurs études dans ce secteur. Les mesures de leur performance et leur durabilité, sont analysées par des méthodes particulièrement développées.

D'après cette synthèse bibliographique, il a été démontré la faisabilité de concevoir des composites cimentaires offrant les performances souhaitées.

Chapitre 02

Evaluation environnementale des matériaux

2.1. Introduction

Les entreprises doivent aujourd'hui répondre à de nouveaux impératifs environnementaux. À cet égard, elles cherchent à mieux définir l'impact de leurs productions, afin de mettre en évidence leurs performances environnementales. Actuellement, la compétition est considérablement élevée dans les marchés du monde entier, dans de telles conditions, présenter des produits ayant des qualités techniques et économiques n'est pas suffisant. Ce qui est important, est qu'ils ont un plus faible impact environnemental par rapport à d'autres produits de fonctions similaires, ceci, leur permet de augmenter considérablement leurs chances dans ces marchés.

En général, l'évaluation d'impacts environnemental d'un produit, est tributaire de sa perception globale par la société du point de vue environnement [Gae02]. Dans la démarche, de démontrer la faisabilité de l'incorporation des granulats de caoutchouc dans le domaine de construction, à savoir les bétons légers, cette partie d'étude s'inscrit. Avant de procéder à une évaluation de l'impact de ces composites incorporant les granulats de caoutchouc (chapitre 05), une synthèse portant sur quelques définitions au sujet de l'évaluation environnementale, ces principes, ces méthodes et ces outils, et le cadre normatif dans lequel elle s'établit, permettra de mettre en lumière les résultats obtenus semble être indispensable.

La mise en place de l'évaluation d'impact environnemental, s'inscrit dans la suite des pressions publiques en faveur de la protection de l'environnement.

2.2. Qu'est ce qu'une évaluation d'impact environnemental?

Poutrel a défini l'évaluation des impacts environnementaux comme étant l'identification, l'organisation et l'évaluation des effets physiques, écologiques, esthétiques, sociaux et culturels d'un équipement ou d'une décision (technique, économique ou politique) [Pou77]. Elle est définie aussi, par l'ensemble des procédés destinés à déterminer et à prévoir l'effet qu'ils peuvent avoir, sur la santé, le bien-être de l'homme, les projets de loi, les politiques, les programmes et les divers projets, elle est destinée aussi, à interpréter et à communiquer les résultats obtenus [Mun79].

Dans un sens plus large, précisément dans le contexte du développement durable, l'évaluation des impacts environnementaux, est définie par les experts internationaux par un processus systématique qui consiste à évaluer et à documenter les possibilités, les capacités et les fonctions des ressources et des systèmes naturels, afin de faciliter la planification du développement durable, la prise de décision et de prévoir et gérer les impacts négatifs et leurs conséquences [Sad96].

L'évaluation des impacts environnementaux, est aussi un outil donnant les descriptifs des effets et des impacts prévisionnels sur l'état d'un projet jusqu'après la fin de sa vie. Cet outil, facilite la prise de décisions optimales et favorise l'atteinte ou le soutien des objectifs fondamentaux, à savoir la protection de l'environnement et le développement durable [Sad96]. Ainsi, cette évaluation n'est pas toujours équivalente d'un endroit à un autre et peut être insignifiante, si elle est prévue pour une longue durée, ce qui bouleverse fortement les décisions qui en résultent [Mun79].

En règle générale, le but de l'évaluation des impacts environnementaux menée de façon scientifique est de connaître les conséquences environnementales dans la phase préliminaire d'avant projet, avant son approbation. Une

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

évaluation tardive pour des projets en cours de réalisation par exemple, en particulier lorsque l'estimation de leurs impacts montre qu'ils ne sont pas à la faveur du milieu dans le quel ils ont été implantés n'atteint pas ces objectifs.

A cet effet, la prise en compte de l'impact environnemental représente une économie appréciable, surtout en ce qui concerne la mise en place de dispositifs correcteurs, de modification ou de compensation. En résumé, on peut dire que cette l'évaluation de l'impact environnemental d'un projet, signifie l'estimation quantitative des différents changements positifs et négatifs, atteignant l'environnement suite à sa création. Cette évaluation, prend en considération tous les effets et les impacts environnementaux des activités relatives au projet étudié, selon l'estimation de certains indicateurs d'évaluation, qui sont mentionnés dans les rapports finals. C'est ainsi, que nous présentons de manière séparée ces indicateurs d'évaluation des impacts dans cette étude.

2.3 Evaluation de l'impact du cycle de vie

L'évaluation de l'impact du cycle de vie, estime l'impact environnemental de toutes les phases de création d'un projet (extraction des matières premières et des émissions polluantes, etc...). Pour ce faire, quatre sous-étapes sont proposées: la classification, la caractérisation, la normalisation et la pondération. La classification permet de déterminer dans quelles catégories d'impact s'inscrivent les émissions et l'extraction des matières premières. L'étape de caractérisation, évalue la contribution des résultats d'inventaire dans chacune des catégories d'impacts. Quant à la normalisation, elle permet de réaliser une évaluation à partir d'un système de référence alors que la pondération, vise une évaluation en fonction d'un choix de valeur [Jol05]. Cette étape, consiste à trois éléments obligatoires: sélection des catégories d'impact, la classification ce qui signifie l'affectation des résultats de l'inventaire (émissions, épuisement des ressources, déchets solides, etc...) aux catégories d'impact choisi, et la caractérisation dans laquelle les résultats convertis sont regroupées en un indicateur résultat [Mar10].

2.3.1 Définition du cycle de vie

Un cycle de vie, signifie le parcours qu'un produit ou un ouvrage traverse. Ce parcours comprend plusieurs phases dans son évolution (www.ciraig.org):

- L'extraction et la transformation des matières premières ;
- La fabrication ;
- L'emballage et la distribution ;
- L'utilisation (Phase de service) ;
- La fin de vie.

Josa et al., ont mis plus de détails dans la figure 2.1, relatifs au cycle de vie du béton, selon cette figure d's l'extraction des matières premières à la démolition [Jos05].

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

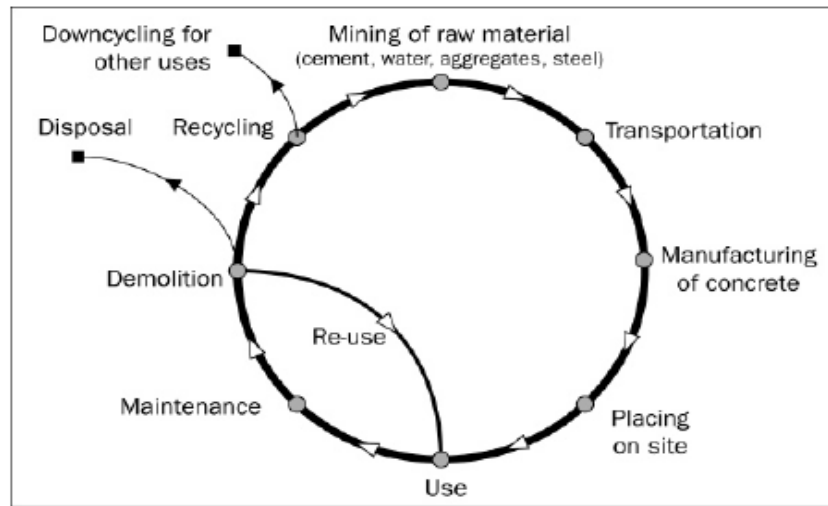


Figure 2.1 Cycle de vie du béton [Jos05].

2.3.2 Analyse du cycle de vie

Le cycle de vie est un processus qui évalue les impacts environnementaux du berceau à la tombe. Il a été généralement, accepté au sein de la communauté de recherche au domaine de l'environnement comme la seule légitime base pour comparer des services, des systèmes ou des matériaux alternatifs.

Aussi une analyse de cycle de vie est une étude quantitative qui prend en considération l'ensemble des impacts sur l'environnement pour chacune des étapes de ce cycle. Ce processus initié autour des années 1970 a fait en 1997 l'objet de normes internationales ISO 14040 et 14044 [BS EN ISO 14040] [BS EN ISO 14044]. C'est une procédure par laquelle les charges environnementales associées à un projet sont mesurés et quantifiés par quantification des énergies et des émissions ce qui implique de nombreuses phases.

La toute première phase est importante, celle de la définition des objectifs et du périmètre de l'étude, ainsi que la délimitation des problématiques envisagées, la nature de l'application et le milieu ciblé, ainsi que le choix relatif à l'unité fonctionnelle, les frontières de l'analyse et la méthode de caractérisation des impacts. Dans la phase la plus importante, celle des données de l'inventaire, un maximum d'informations est collecté de la matière première jusqu'au l'émission et/ou le recyclage des produits. Les impacts sont ensuite évalués par des méthodes bien spécifiées. L'analyse du cycle de vie permet de comparer les résultats obtenus avec ceux des matériaux concurrents et ceux couramment utilisés, afin d'établir des conclusions, des modifications et des recommandations et à la fin d'identifier les phases du cycle de vie sur lesquelles il faut agir pour réduire les impacts environnementaux négatifs.

2.3.3 Principes d'une analyse de cycle de vie

Il est nécessaire d'intégrer l'ensemble des étapes de la vie d'un produit. Ceci permet d'éviter tout transfert d'impact d'une phase du cycle de vie à une autre. Dans cette analyse les impacts environnementaux d'un produit sont estimés alors que les impacts sociaux ou économiques ne sont pas pris en compte dans cette démarche. Etant aujourd'hui l'outil le plus fiable pour évaluer les impacts environnementaux des projets ou des produits, la complexité et l'hétérogénéité des analyses de cycles de vie, exigent de rester prudent quant à leurs résultats, ils

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

doivent être correctement interprétés afin de garantir une bonne utilisation des données en prenant en compte le plus grand nombre d'aspects environnementaux possibles.

2.3.4 Unité fonctionnelle

L'analyse d'un cycle de vie consiste en premier lieu à définir, selon l'objectif de l'étude " l'unité fonctionnelle " des différents produits étudiés. Cette unité doit être la même, afin de permettre une comparaison objective des performances. L'analyse consiste à prendre en compte à la fois une unité de produit et une unité de fonction.

Cette unité, sert aussi à quantifier le service rendu par un produit, afin de quitter le domaine purement qualitatif vers un domaine quantitatif, elle doit être précise, mesurable et additive et pouvant comparer les produits entre eux. Dans le domaine de la construction, cette étape est fondamentale, dans le cas d'un matériau tel que le béton, qui participe à la fois à la structure et à l'enveloppe d'un bâtiment, il est particulièrement facile de définir une unité permettant d'écarter tous les autres matériaux qui n'ont pas ces particularités.

Une grande attention, devra donc être prêtée à cette phase fondamentale pour la validité des conclusions tirées de l'analyse de cycle de vie [Cim901].

2.3.5 Les limites de l'analyse du cycle de vie

Toute considération technique doit être limitée, certaines limitations sont à prendre aussi en compte lors d'une analyse de cycle de vie, ceci permet d'évaluer les impacts potentiels réels, mesurés pour un produit ou un ouvrage ou même d'un service. Ceci permet aussi, de rester dans la plage relative au domaine et à la qualité des données entrées au début de l'étude (Champs d'étude, unité fonctionnelle, etc..). Ainsi, chaque type et volume d'étude nécessitent des facteurs bien spécifiés pour sa réalisation.

La nécessité d'une banque de données suffisamment riche lors d'une analyse de cycle de vie d'un nouveau produit, afin d'obtenir un large intervalle de choix de techniques, qui décideront à la fin la qualité d'impact de ce produit. Les résultats d'une analyse de cycle de vie ne sont pas toujours favorables et souvent les recommandations faites après une telle évaluation sont en conflit avec d'autres intérêts liés au produit tel que des considérations économiques ou sociales pour lesquelles il a été conçu.

2.3.6 Inventaire du Cycle de Vie

L'inventaire de cycle de vie, compile de façon quantitative les matières premières depuis leur extraction et leurs émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol [Jol05]. L'analyse de l'inventaire est donc la comptabilité physique ou le suivi des flux élémentaires entrants et sortants du système (émissions et rejets) de la nature (énergie et matière première) et des flux de retour à la nature (émissions atmosphériques, dans l'eau et le sol) [Ath14]. Donc, il consiste à répertorier tous les flux de matières et d'énergies entrantes et sortantes, pour chaque étape du cycle de vie, on se retrouve alors avec un bilan des consommations et des émissions [Men14]. Il est réalisé essentiellement, d'une collecte de données primaires, issues des informations transmises par le producteur ou bien des bases de données. En général plusieurs sources sont utilisées, les données manquantes, incomplètes ou difficilement accessibles sont

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

remplacées par des données secondaires disponibles dans la littérature. Une fois ces dernières sont recueillies, elles doivent être validées et associées aux processus et aux flux élémentaires définis pour chaque étape du cycle de vie.

2.4 Indicateurs d'impacts environnementaux

Les indicateurs d'impacts, sont les éléments clés des mesures des paramètres environnementaux, à partir de différentes méthodes spécifiques. Ils fournissent tout d'abord, la mesure de l'état actuel des éléments de l'environnement, ils permettent ensuite l'estimation des agressions résultant de la création des matériaux ou des ouvrages sur les composants du milieu. L'analyse des indicateurs se fait en suivant divers protocoles, utilisant de diverses sciences, afin qu'ils mettent en évidence des connaissances suffisantes identifiant correctement ces impacts environnementaux.

Au vu de leur nombre, qui rend la comparaison de deux produits ou deux projets difficiles, ce qui implique, l'évaluation des indicateurs les plus retenus, les plus représentatifs et permettant d'avoir des grandeurs, afin de les comparés à d'autres matériaux qui remplissent les mêmes fonctions. En effet, les indicateurs conçus pour représenter au mieux un impact environnemental, pouvant être identifiés et quantifiés, on trouve le plus souvent [Ath14]:

- Acidification potentielle
- Eutrophisation aquatique potentielle
- Potentiel de réchauffement planétaire
- Critères de la santé humaine Air mobile
- Ozone déplétion potentiel
- Smog potentiel
- Energie primaire totale
- Energie non renouvelable
- Consommation de combustions fossiles

2.4.1 Critères d'évaluation des indicateurs d'impact environnemental

Les critères servant le mieux pour l'évaluation des indicateurs, dont on parle en grande partie dans la littérature sont divers, selon Gudmundsson et al., ils doivent être validés, c'est-à-dire, mesurant et traduisant les variations importantes de ce qu'ils sont censés mesurer, ainsi, un recalcule du même indicateur doit donner la même valeur. Ces indicateurs doivent être aussi simplement mesurables que possible avec des moyens limités et des données d'entrée disponibles et compatibles avec les droits humains. Ils doivent être, abordables et faciles à comprendre et critiquables par l'utilisateur, permettant une interprétation intuitive et sans ambiguïté, liés aux objectifs pour lesquels, ils ont été mesurés et pouvant être modifiés selon la décision [Gud10].

2.4.2 Les principaux indicateurs de l'évaluation d'impact environnemental

2.4.2.1 Effet de serre

Depuis plus d'une centaine d'années, il a été constaté que l'augmentation des températures moyennes des océans et de l'atmosphère ne cesse de s'accroître à des rythmes méconnus; les ouragans, sécheresses accentuées ou bien des inondations et les tempêtes tropicales. Certaines régions connaissent un refroidissement, tandis que d'autres connaissent un réchauffement. Selon la figure 2.2, exprimant la concentration du CO₂ en fonction du temps, on constate que cette concentration ne cesse de s'accroître de plus en plus, en particulier, depuis l'année 2000.

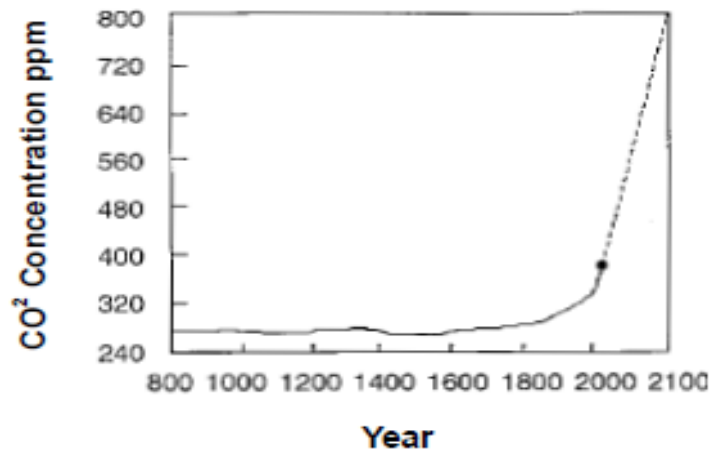


Figure 2.2 Historique et futur des concentrations du CO₂ dans l'atmosphère [Kum01].

L'élévation du niveau de la mer en conséquence de la fonte des glaces (le cas de Kilimindjarou), sont aussi d'autres manifestations du changement climatique. Les études menées par plusieurs scientifiques du monde entier, ont prouvé que le développement industriel, en particulier dans les pays développés tels que l'Amérique et l'Europe est responsable de la majorité de ces émissions en produisant du CO₂, ce qui a mis l'activité humaine responsable en grande partie du réchauffement climatique.

Chaque gaz, présent dans l'atmosphère a un pouvoir de réchauffement plus ou moins important, en fonction de ses propriétés optiques et de sa durée de vie (ou persistance dans l'air).

Ces gaz à effet de serre permettent aux ondes provenant du soleil et à la chaleur de pénétrer dans l'atmosphère et de chauffer la surface de la terre et d'échapper dans l'espace, ceci, accroît la température de l'atmosphère et de la surface de la terre. Une petite augmentation de la quantité de gaz à effet de serre provoque une réponse améliorée dans la montée de la température mondiale [Zas11].

La contribution des émissions de gaz à l'effet de serre global est évaluée par des indicateurs qui tiennent compte de l'accroissement et du forçage radiatif de chaque gaz dans l'atmosphère, qui est la capacité d'absorption des rayonnements infrarouges sortants.

Ces gaz ont des propriétés radiatives et des durées de séjour dans l'atmosphère très différentes, ce qui empêche toute comparaison directe de l'effet de leurs émissions sur le climat global. Ainsi, un kilogramme de méthane (CH₄) contribue 21 fois plus à l'effet de serre qu'un kilogramme de CO₂, et un kilogramme de protoxyde d'azote (N₂O), contribue 310 fois plus. Certains gaz contribuent plusieurs milliers de fois plus que le CO₂ à l'effet de

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

serre pour chaque kilogramme émis. Le dioxyde de carbone (CO₂) est utilisé comme gaz de référence pour établir une équivalence en pouvoir radiatif de chaque gaz : CO₂, méthane, N₂O, HFC, PFC et SF₆, afin d'examiner l'effet global avec une pondération de chaque gaz, le tableau 2.1 récapitule la contribution des gaz à l'effet de serre par rapport à un kilogramme équivalent du CO₂ [Hei92].

SUBSTANCES	PRG (kg CO ₂ -éq/kg)
CO ₂	1
CH ₄	11
N ₂ O	270
FCKW 11	3,400
FCKW 12	7,100
CF ₄	> 4,500
C ₂ F ₆	> 6,200
FCKW 13	4,500
CCl ₄	1,300

Tableau 2.1 PRG de quelques substances estimé à une période de 100 ans [Hei92].

Le CO₂ est un gaz à effet de serre à longue durée de vie, à peu près 100 ans. Ce qui signifie que les efforts pour limiter ou diminuer ces émissions, ne seront effectifs que dans un siècle. Le CO₂ est produit par la combustion des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) et la consommation des énergies, produisant des concentrations élevées des gaz, lors de la transformation de la matière première en particulier, la production du ciment (calcination du calcaire). En plus, le CO₂ représente les 3/4 des gaz générés dans le globe, à cet effet il est une référence pour les mesures des effets de réchauffement global ou des gaz à effet de serre.

L'indicateur d'effet de serre le plus utilisé à ce jour, est le Potentiel de réchauffement global (PRG), malgré la proposition d'autres indicateurs d'effet de serre alternatifs, tel que le PTG (Potentiel de température global). Ce dernier est défini comme étant le rapport entre la perturbation du bilan radiatif de la terre pendant une période déterminée, généralement de 100 ans, suivant l'émission ponctuelle du gaz et la perturbation sur la même période d'une émission ponctuelle d'une même masse de CO₂. Donc, le PRG pris égal à l'unité, représente l'effet combiné de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère, de sa durée de vie et de son efficacité d'absorption du rayonnement infrarouge [For07].

De nombreux progrès sont faits en termes d'écologie par le biais de la science, afin de trouver des solutions pour stopper l'accumulation des gaz à effets de serre dans l'atmosphère. D'où est indispensable de quantifier les gaz engendrés par chaque nouvelle activité, matériau ou projet, afin d'annuler toute nouvelle participation à ce phénomène et pouvoir réduire l'effet de serre. Ces solutions sont nombreuses et se résument dans les plus récentes méthodes d'évaluation de l'impact environnemental de toutes innovations technologiques.

$$1 \text{ kg CO}_2 \text{ équivalent dans l'air} = 1 \text{ kg PRG} \quad (2.1)$$

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

2.4.2.2 Acidification atmosphérique potentielle (AP)

L'acidification de l'atmosphère, est connue depuis très longtemps dans les zones urbaines ou industrielles sous le nom bien connu de "smog acide" ou "smog Londonien". Les phénomènes de pollution acide à grande échelle ont été mis en évidence par l'acidification des eaux des lacs Scandinaves et Canadiens dans les années 70. Certains composés émis dans l'atmosphère (notamment le dioxyde de soufre SO₂, les oxydes d'azote NO_x) sont susceptibles d'être oxydés et de se transformer en acides (acide sulfurique, acide nitrique), l'acidification des sols et des eaux se produit à travers la transformation de ces polluants atmosphérique en acides, qui sont ensuite repris par les précipitations atmosphériques. La chute des "pluies acides" forme une entrée d'acide absorbée par les plantes, le sol et l'eau de surface, les retombées de ces polluants perturbent le sol et l'eau. Cela conduit à une diminution de la valeur du pH de l'eau de pluie et de brouillard 5,6 à 4 et même en dessous, ce qui réduit l'alcalinité des eaux de surfaces en particulier. Donc le potentiel de l'acidification est décrit comme la capacité de certaines substances à construire et à libérer des ions H⁺ [Ash10].

Ce type de contamination est causé par le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde d'Azote et le dioxyde d'Azote (NO₂), ou encore l'Ammoniac (NH₃) qui en résulte de la combustion de fossiles lors de la production d'électricité ou le chauffage. Le potentiel d'acidification est calculé en équivalent (SO₂). Ce gaz provient en grande partie du processus de combustion de carburants fossiles quand le Soufre réagit avec l'Oxygène, alors que les émissions de dioxyde d'Azote (NO₂) proviennent principalement par les processus de combustion à hautes températures (véhicules motorisés et usines), pendant le transport par bateau ou par camion, les deux émissions sont produites.

La durée de vie du SO₂ dans l'atmosphère, est de l'ordre de 2 à 5 jours, il retombe sec ou humide en partie à proximité des sources mais aussi à des centaines, voire des milliers de kilomètres de leurs sources émettrices et se transforme en sulfates ou en acide sulfurique selon les conditions. Puisque ces polluants sont transportés à grande distance à de concentrations différentes, l'acidification potentielle (AP) est mesurée selon le milieu étudié c'est-à-dire de façon régionale, en estimant les concentrations de NO_x et de SO₂ (tableau 2.2). Cet indicateur est calculé sur la base des protons d'Hydrogène (H⁺).



SUBSTANCES	P A (kg SO ₂ éq / kg)
SO ₂	1,00
NO	1,07
N ₂ O	0,70
NO _x	0,70
NH ₃	1,88
HCl	0,88
HF	1,60

Tableau 2.2 Acidification potentiel de quelques substances [Hei92].

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

2.4.2.3 Eutrophisation

L'eutrophisation est un processus naturel lent, c'est un phénomène de dégradation qui atteint l'environnement aquatique, elle est due essentiellement au développement des substances nutritives dans l'eau suite à l'augmentation des concentrations en Phosphates et en Nitrates, ce qui favorisent généralement la croissance des algues qui absorbent l'oxygène contenu dans l'eau en empêchant la lumière d'atteindre le fond des surfaces d'eau. L'écosystème se retrouve dépourvu de ses éléments nécessaires pour continuer à vivre, suite à l'augmentation des matières organiques biodégradables et les bactéries appauvrissant de plus en plus l'eau de l'Oxygène. Il y a d'autres facteurs qui favorisent ce phénomène, tels que rejets domestiques agricoles et industriels dans les cours d'eau, menant ainsi à de nouvelles conséquences comme les mauvaises odeurs surtout dans le cas des eaux peu renouvelées.

Ainsi, une augmentation de la température induit une augmentation de l'évaporation et conduit à un accroissement des concentrations en nutriments dans les eaux, ce qui favorise également l'eutrophisation [Dao10]. Feuchtmayr et al., ont prouvé qu'une augmentation de température (entre 21 et 25°C) combinée à une augmentation de la concentration en phosphore dissous, favorise spécifiquement le développement des macrophytes flottants, au détriment du phytoplancton [Feu09].

Le Phosphore est souvent considéré comme facteur limitant en eau douce [Smi99], ainsi, le rôle de l'azote ne doit pas être sous-estimé, il est considéré parmi les gaz très réactifs et plus polluants pour l'atmosphère. Dans le cas de l'eutrophisation, il réagit avec l'eau selon la réaction suivante :



Les lacs et les réservoirs reçoivent alors des apports considérables de sédiments et autres matériaux en saison de pluie [Dao10].

2.4.2.4 Matière Particulaire, critère d'air mobile :

Les liens entre la pollution atmosphérique et ses effets sur la santé humaine sont mieux connus malgré les difficultés inhérentes aux études de type environnemental, qui ont mis en relation l'environnement et la santé humaine. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, "trois millions de personnes meurent chaque année sous l'effet de la pollution atmosphérique, soit 5% des 55 millions de décès annuels dans le monde. Vu la marge d'incertitude des estimations, le nombre réel des décès annuels pourrait se situer entre 1,4 et 6 millions" (www.environnement.doctissimo.fr).

Les polluants peuvent être des gaz, mais ils peuvent être aussi sous autres formes de particules, qui sont agressives pour l'organisme humain, ils proviennent en particulier des environnements urbains des fumées des usines dans les zones urbaines, de la circulation automobile engendrant une explosion de particules fines dans l'air et de la qualité des matériaux des constructions ou de bricolage. Les particules fines forment également la réaction des gaz ou des gouttelettes dans l'atmosphère à partir de sources telles que les centrales électriques (www.ephtracking.cdc.gov).

L'augmentation de niveau de certains polluants a des risques accrus pour la santé. Il s'agit principalement des particules fines, PM_{2,5} (particules de moins de 2,5µm de diamètre) et PM₁₀ (particules de moins de 10µm de

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

diamètre). La présence de ces particules dans l'air réduit la visibilité horizontale et provoque une apparition floue de l'air lorsque ces niveaux sont élevés avec peu ou pas de vent (www.health.ny.gov).

L'évaluation de l'impact de ces matières particulaires (PM) de tailles inférieures qui font partie de la catégorie des particules respirables, est en réalité un indicateur clé de la pollution, elle aide à identifier les domaines où les interventions visant à réduire la pollution de l'air pourraient améliorer significativement les conditions sanitaires. Ces très petites particules sont inférieures à 1/30 de la largeur d'un cheveu humain (www.ephracking.cdc.gov), peuvent être transportées dans l'atmosphère sur de longues distances, donc leurs sources restent incertaines. Leurs tailles ont été toujours considérées comme critère de décisions de leur gravité pour la santé.

2.4.2.5 Formation d'ozone photochimique

Dans certaines conditions climatiques, les émissions atmosphériques provenant de l'industrie et le transport peuvent être piégés au niveau du sol où en présence de lumière solaire, ils produisent le smog photochimique [Rag10], appelé assez souvent 'smog estival', signifiant la production d'ozone au niveau du sol. Cet ozone résulte de la transformation chimique de l'oxygène au contact d'oxydes d'azote (NOx) et d'hydrocarbures, sous l'effet du rayonnement solaire et d'une température élevée (phénomène de smog photochimique ou pics d'ozone. Alors que l'ozone est un gaz protecteur dans les hautes couches de l'atmosphère, il devient un gaz dangereux (irritant respiratoire) dans les basses couches de l'atmosphère (troposphère) où nous vivons et respirons [Rei14].

Cet indicateur sert donc à évaluer la contribution des émissions dans l'air de composés susceptibles de participer à la formation d'ozone troposphérique. Ce phénomène se traduit par un brouillard urbain lors d'une période de grande pollution, il peut être causé par les hydrocarbures et la combustion des carburants tels que le pétrole ou le gaz, les émissions provenant des composés organiques volatils ainsi que les émissions dues aux transports par les bateaux et les camions et aux différentes étapes de fabrication et de recyclage des différents matériaux où on utilise de grandes quantités d'énergie émettant des substances dans l'atmosphère d'émission de O₃ équivalent de masse, estimées par mesure.

Dans certaines conditions climatiques, ces émissions atmosphériques restent piégées au niveau du sol, qui en contact de la lumière solaire produisent le smog photochimique par interaction de composés organiques volatils et les oxydes d'azote (NOx).

2.4.2.6 Destruction de la couche d'ozone

La couche d'ozone est un écran protégeant la terre des rayonnements ultra violet, composée de molécules d'ozone dans la stratosphère, qui se prolonge d'environ 15 à 50 km au-dessus de sa surface. L'émission de certains substances telles que les Chlorofluorocarbones (CFC), les halons et les produits chimiques appauvrissent cette couche protectrice l'amincisse et l'endommage. Les rayons peuvent atteindre la surface de terre, ce qui expose les êtres vivants dans ce cas à un affaiblissement du système immunitaire et à plusieurs maladies par conséquent, le système écologique s'en trouve perturbé aussi (www.ziegel.at/gbc).

Cet indicateur, cherche à évaluer la contribution du produit à la destruction de la couche d'ozone, il se calcule en agrégeant les émissions dans l'air des composés susceptibles de réagir avec l'ozone de la stratosphère (les chlorofluorocarbures: CFC, HCFC). Généralement, les rejets atmosphériques appauvrissant la couche d'ozone sont

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

pondérés par ODP (Ozone Depletion Potential), La quantification de leur action est extrêmement difficile en raison des phénomènes complexes qui ont lieu dans la stratosphère. La molécule de référence est le CFC 11. L'indicateur s'exprime en kg équivalent CFC 11. L'ODP est le rapport de l'impact d'un composé sur l'ozone par rapport à l'impact d'une masse similaire de CFC-11. Il fournit une mesure de l'effet chronique cumulative sur l'ozone pour chaque unité libérée dans l'atmosphère. Seuls les facteurs ODP des différents (CFC) sont déduits par calcul, même si il y a d'autres éléments qui donnent lieu à des réactions chimiques ou à l'effet de serre et sont donc en partie directement ou indirectement responsable de la destruction de la couche d'ozone.

2.4.2.7 Consommation d'énergie

Cet indicateur représente la consommation des énergies fossiles, minerais ou l'énergie solaire. Certaines de ces énergies quantifiables peuvent être renouvelables ou non renouvelables. Elles sont celles consommées lors de la production des matériaux de construction et pendant la phase de vie lors des activités de démolition [Dix10] (énergie primaire), ou bien au niveau de l'utilisation finale (énergie finale). Ces énergies sont atteintes par des pertes dues à la production et au transport, donc la quantité d'énergie finale est toujours plus faible que l'énergie primaire [Cim901].

Les énergies grises nécessaires pour extraire, transformer, transporter et installer un élément de construction donné, sont mesurées en Méga Joules (MJ) ou Giga Joules (GJ) par unité de poids (Kilogramme ou Tonne) ou unité de surface (Mètre carré). Cette énergie est la somme de l'énergie contenue dans les matériaux qui pourraient être utilisés comme combustible et qui sont principalement fossiles ayant les émissions les plus élevées, elle s'oppose à l'énergie des procédés, qui est l'énergie nécessaire à la transformation du matériau en produit final. La somme des deux donne l'énergie Primaire Totale [B901].

2.4.2.8 Impact des déchets solides éliminés

Le scénario de fin de vie est commun à tous les produits et correspond par défaut à une mise en décharge, ce choix semble complexe au vu des différentes possibilités qui existent en fin de vie. Les déchets solides des matériaux tels que le béton, céramique, bois, les métaux et les matières plastiques ne sont pas biodégradables, ils doivent être recyclés ou pénalisé au lieu d'être enfoui ou incinéré, ce qui est intéressant de point de vue environnemental. Ils sont estimés sous forme de masses en kilogrammes et sont généralement auto-explicatif.

Aucune tentative n'a été faite pour classer d'avantage leurs émissions au sol soit comme dangereux ou non dangereux. En plus, il est rare que les matériaux spécifiés dans un projet de construction émettent des quantités significatives de déchets solides dangereux.

L'indicateur d'évaluation des déchets éliminés, peut donc correspondre soit à un des trois flux d'inventaire, ou à la somme pondérée des trois.

2.5 Impact des matériaux de construction sur l'environnement

Depuis que les chercheurs dans le domaine de la construction, se sont mis au service du développement durable, autres se sont mis à prouver que les produits qu'ils développent sont des produits qui répondent à la fois aux normes techniques et aux exigences de la durabilité et qu'ils respectent l'environnement.

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

L'ensemble des produits impliqués dans l'industrie de la construction ainsi que toutes les activités liées à cette industrie contribuent à la création d'un environnement ayant des caractéristiques relatives aux matériaux intégrés et leurs sources et à la construction réalisée avec ces matériaux, elles sont relatives aussi aux types d'usage et au volume de la construction. L'environnement est affecté par leurs contributions à la pollution suite à leur fabrication et utilisation.

Les matériaux de construction consomment de l'énergie importante produisant aussi, une chaîne de conséquences sur l'environnement, durant leurs vies de service et après la fin de ces vies quand ils deviennent des déchets. Ceci, implique de grandes quantités d'énergie intrinsèque [Wag13], et une consommation non négligeable des ressources fossiles et non renouvelable [Cab13]. Pour répondre aux besoins exigés par les populations en matériaux de construction, selon les choix et les quantités, la production et la consommation de ces derniers augmentent, par conséquent, les déchets résultants se multiplient par les phases allant de l'installation du chantier jusqu'à la démolition après la fin de vie de la construction, ceci affectent et dégradent l'environnement (air, sol et eau). Donc il est préférable et facile de gérer la consommation des matériaux et d'envisager l'impact de leur utilisation sur l'environnement.

Cette tendance de consommation incontrôlable, se traduit par la dégradation de l'environnement à l'échelle mondiale, la pratique habituelle après chaque fin de vie d'une construction produisant ainsi des déchets. Pendant le temps humide, il y a le potentiel des produits chimiques contenus dans ces matériaux de s'infiltrer dans le sol et la possibilité d'être transportée à la surface adjacente et sous masses d'eau souterraines. Nelson et al., ont signalé que cela pourrait entraîner des effets environnementaux négatifs sur la santé écologique [Nel01].

Le béton a de bonnes performances, qui offrent aux structures la durabilité et la résistance aux différentes agressions, ceci, fait de lui le matériau le plus utilisé à l'échelle mondiale. Des milliards de tonnes de bétons sont utilisés, ce qui implique l'utilisation du ciment étant la liaison de ces constituants.

En 2015, le monde a produit environ 3,3 milliards de tonnes de ciment [Hen14]. En Algérie, la consommation annuelle est d'environ 22 millions de tonnes de ciment dont 18 millions de tonnes sont produits localement (www.lematindz.net) et la demande en cette matière avoisine les 24 millions de tonnes (www.maghrebemergent.info). Une croissance en consommation est reliée à l'augmentation du besoin en béton. En outre, la production du ciment nécessite de l'énergie (figure 2.3) et de la haute température dans son processus de fabrication, elle contribue grandement à la production des gaz à effet de serre suite à la poussière dégagée des fours, ainsi que l'exploitation minière pour l'extraction des agrégats constituant la matière première.

Par rapport à la production du ciment, les autres composants du béton nécessitent très peu d'énergie, pour les obtenir et génèrent moins de dioxyde de carbone (CO₂) lors de la transformation de la matière première.

L'inquiétude croissante au sujet de l'environnement, a généré la recherche de procédés de production plus durable. Le monde entier s'est orienté dans la majorité des recherches élaborées dans ce domaine, vers la réduction des émissions dues à l'industrie du ciment. La nécessité de cette démarche, afin de minimiser la consommation du ciment dans les constructions et par conséquent réduire la consommation énergétique par la proposition de matériaux de construction meilleurs sur le plan écologique, émettant moins de CO₂ et consommant moins d'énergie, provenant de ressource renouvelable et aisément recyclable. En Algérie, cette stratégie est loin d'être l'objectif du

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

gouvernement, chaque année le besoin au ciment augmente et sa production l'est aussi pour la construction des structures et des édifices publics et les constructions à usage d'habitation.

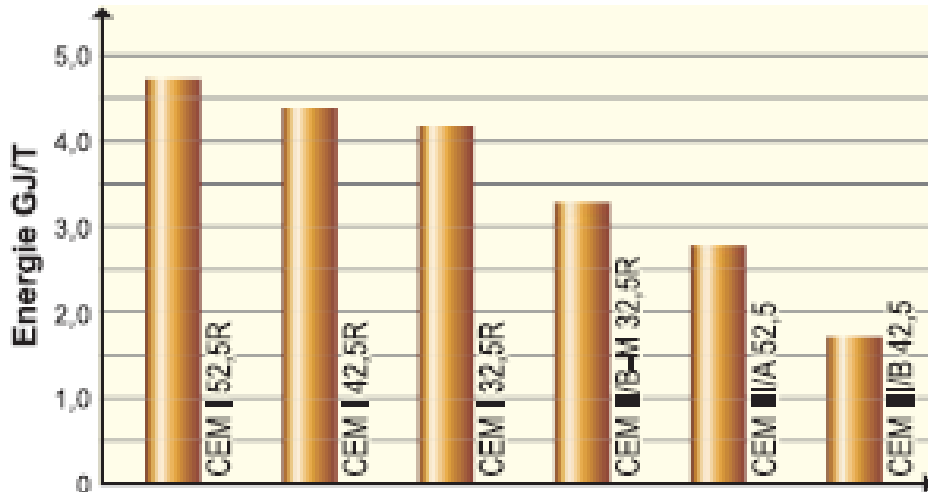


Figure 2.3 Dépenses énergétiques pour la production des différents types de ciment.

Le béton est également, 100% recyclable, il peut être broyé et réutilisé comme agrégat dans de nouvelles applications, en raison des proportions de ces constituants qui sont bénéfiques pour les constructions.

Donc, l'impact du béton sur son environnement est lié dans tous les sens à ces constituants, le ciment en particulier, il en résulte que dans un pays en voie de développement avec l'augmentation démographique comme l'Algérie où le secteur de la construction est un secteur vif, la consommation du béton et du ciment va augmenter et l'environnement par conséquent, ne peut qu'être affecté. Ainsi, l'évaluation de plusieurs constructions, ont confirmé que la phase d'extraction de la matière première et la phase opérationnelle ont le plus important impact sur l'environnement, alors que les phases de construction et d'entretien ainsi que celle de fin de vie, ont un impact moins important [Sill3]. Montens, a signalé que l'analyse du cycle de vie du béton (Production de la matière première, transports, chantiers, mise en œuvre, vie de l'ouvrage, démolition et recyclage), montre que les impacts environnementaux de la matière première utilisées pour sa production et sa mise en œuvre sont importants, alors que ceux liés à la durée de service sont minimes et que ce matériau offre en fin de vie une excellente recyclabilité [Mon09]. Donc il est à noter, que les matériaux de construction ont un impact majoritaire sur l'environnement.

2.5.1 Cycle de vie du béton

Chaque matériau, quelle que soit sa composition, a son impact sur l'environnement, depuis sa production jusqu'à son élimination après sa fin de vie. L'Analyse du cycle de vie est très intéressante, car elle permet de visualiser largement le processus de production [Che97].

Généralement, le cycle de vie du béton comporte trois phases (figure 2.4), la première regroupe l'extraction des ressources, le transport et la production de la matière, la deuxième réunit les étapes de son utilisation, son entretien et la réparation du matériel, la troisième représente la fin de vie du matériau, son élimination et son recyclage.

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

Il ya plusieurs facteurs liés à la conception des mélanges de béton et des structures qui peuvent affecter la libération de contaminants dangereux de béton pendant son cycle de vie. Ces facteurs tels que la source, la forme, la taille et la composition chimique, la conception structurelle, la production et l'utilisation rendent l'évaluation environnementale du béton plus complexe [Mor11].

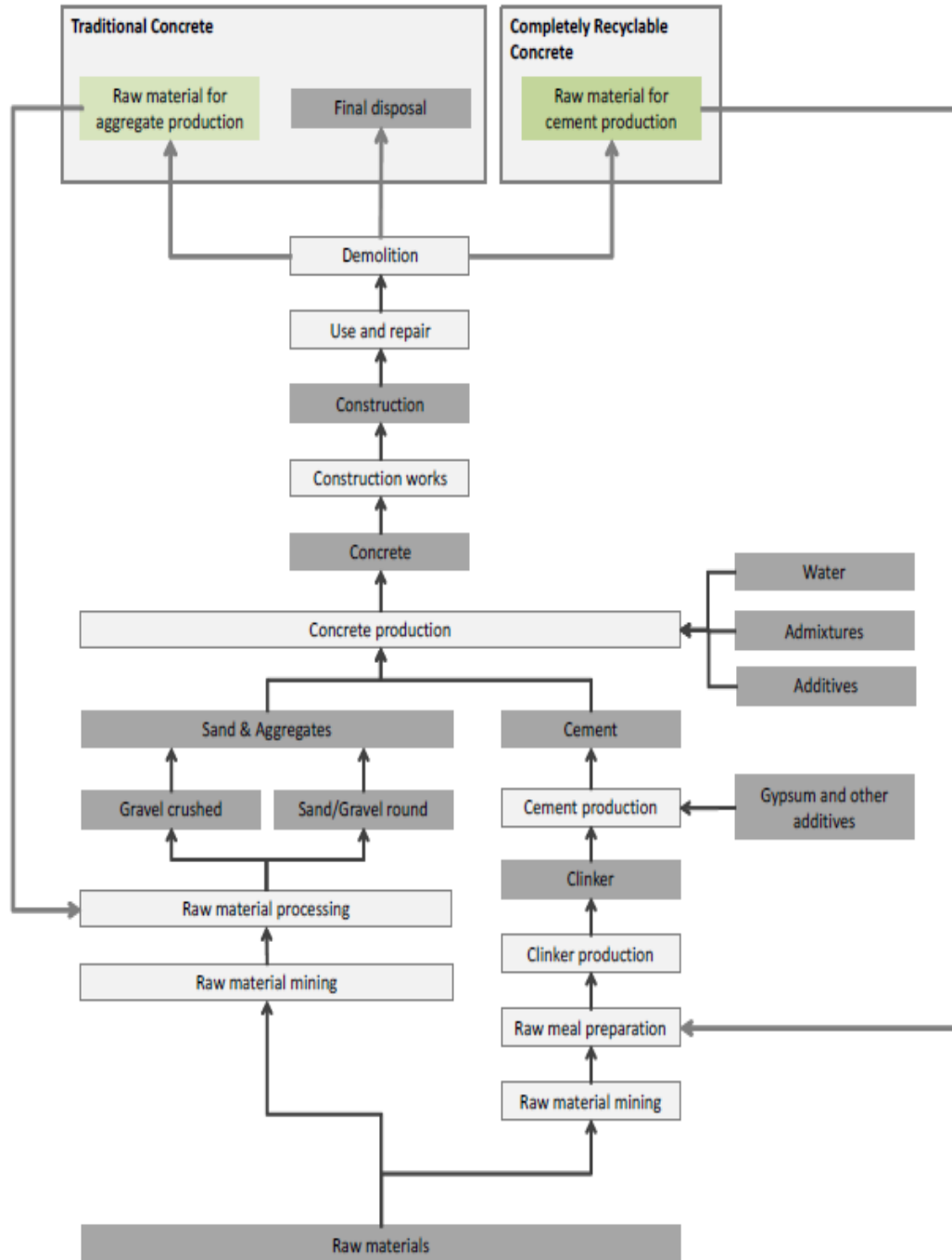


Figure 2.4 Cycle de vie du béton [Ath14].

La prédiction de l'impact environnemental du béton ne peut être donc représentative ni généralisée si un seul test est fait avec tous les différents paramètres qui sont pris en compte, ce test peut être aussi trop conservateur. Actuellement, la recherche durable d'un respectueux béton pour l'environnement, nécessite l'évaluation de son

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

impact direct sur l'environnement avant sa mise en place, ce qui consiste à comptabiliser l'ensemble des impacts de chaque matériau le constituant et à le comparer à d'autres bétons.

La fin de la durée de vie peut être discutée à partir de deux aspects. Il peut se référer à la fin de la durée de vie d'un matériau particulier où l'entretien ne peut pas restaurer sa fonction initiale ou il peut être rentable de le maintenir. L'autre aspect de fin de vie, peut se référer à l'ensemble de la structure même si certains des matériaux peuvent encore fonctionner. L'éventuel remplacement et la destruction des matériaux finiront dans une décharge. Les matériaux, qui sont recyclables et biodégradables, sont sélectionnés pour être utilisés afin de réduire les exigences en matière d'enfouissement et les émissions des polluants.

2.5.2 Evaluation environnementale des matériaux innovants

Les déchets sont, soit dangereux, représentant un danger spécifique pour la santé de l'homme et son environnement, soit des déchets inertes qui n'altèrent ni le sol, ni l'eau ni l'air et qui donc ne devraient entraîner aucun préjudice pour l'environnement et la santé humaine. Ils peuvent être éliminés de différentes manières: par incinération, par enfouissement ou par valorisation. Toutefois, ces différentes techniques d'élimination de déchets, ne sont pas sans effet ni risques sanitaires, surtout dans le cas des incinérations qui libère et du CO₂, de la vapeur d'eau, d'azote et d'autres gaz inertes en plus d'autres matières susceptibles d'endommager l'environnement [Dou06].

La mise en œuvre du matériau de construction classique, tel que le béton est décrite dans un cadre normatif, souvent, dans des documents techniques usuels. Ils sont commercialisés facilement puisque leur utilisation a fait preuve de réussite. Ces derniers temps, ce matériau n'est plus le même, on le trouve incorporant d'autres constituants, autres que ceux traditionnels, tels que les matériaux issus de la valorisation de plusieurs sortes de déchets (Verre, plastique, caoutchouc, etc...)

Dans le monde entier, un produit de construction n'est utilisé qu'après l'obtention d'un avis technique favorable, approuvant une assurance décennale, satisfaisant le demandeur. Les constructeurs ne peuvent être confiants du matériau sans cette assurance et ne peuvent courir le risque d'utiliser un matériau novateur. L'instruction de la procuration de cet avis doit être donnée par le gouvernement (Ministère de l'environnement) à chaque fois où un matériau innovant est déclaré, avant son lancement sur le marché. L'utilisation des bétons innovants doit se plier à une démarche certificative plus complexe. C'est la condition de garantie pour le constructeur et l'utilisateur et l'ouvrage à la fois. Donc, les producteurs de ces matériaux innovants sont dans l'obligation de prouver leurs performances de mise en œuvre et de service [Die13].

L'industrialisation des pays a eu pour conséquence dans ce domaine un remplacement progressif des matériaux élaborés localement par des matériaux industriels. Ce nouveau courant s'est imposé progressivement dans le génie civil et a donné naissance à de nombreuses formes de valorisations de matières donnant naissance à de plusieurs générations de matières recyclées. Rendre ces matériaux, en terme d'environnement acceptables est une démarche de suppression des incertitudes pour avoir d'eco-matériaux sur tous les plans et de limiter la fluctuation des produits nouveaux, générée par le recyclage des déchets.

La mise en œuvre d'un processus d'évaluation environnementale, devrait donc intervenir le plus tôt possible, car ' le moment idéal pour étudier en détail les aspects environnementaux, sociaux et autres des nouveaux projets se situe très tôt, dès le stade de la formulation du projet; l'évaluation des impacts, doit se faire parallèlement

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

aux évaluations économiques et techniques, l'étude des premières devant être intégrée à celle des secondes [Mun79]. C'est la raison pour laquelle les responsables de la création des matériaux innovants, sont obligés d'évaluer leur comportement et de faire les modifications nécessaires avant de les utiliser, afin d'éviter les dommages environnementaux.

2.6 Outils d'évaluation environnementale

Les concepteurs ont recherché depuis toujours des moyens permettant de quantifier et d'analyser l'impact des constructions et d'autres produits sur l'environnement. Depuis un certain temps, un grand nombre d'outils d'évaluation du cycle de vie, ont été développés pour rendre ceci possible, en particulier avec l'accélération de l'industrialisation de tous les secteurs de vie

Pour faciliter l'évaluation environnementale, et permettre aux différents acteurs de définir les enjeux relatifs aux impacts environnementaux d'un projet futur tel que le bâtiment à l'aide d'une base de données, plusieurs outils (Logiciels) comprenant d'importantes bases de données sont disponibles dans le commerce. Le choix de l'un de ces outils, porte sur l'exhaustivité des informations disponibles concernant les impacts, ce choix porte aussi sur la facilité d'utilisation du logiciel et sa capacité à réussir des études plus au moins complètes, comme il se base sur les différents avis et informations trouvés à son sujet.

Certains de ces logiciels comportent des bases de données permettant de réaliser l'inventaire de cycle de vie et proposent également une caractérisation spécifique des impacts par le biais d'un nombre important d'indicateurs. Parmi ces logiciels, on trouve : Simapro , GaBi, Umberto , TEAM, SIEC, certains sont dédiés à des secteurs particuliers tel que le bâtiment, on cite Elodie, Cocon, Team Bâtiment, Eco-Bat, Equer, BEES (développé par l'agence de protection de l'environnement aux Etats Unis) et Athena. On trouve aussi d'autres outils qui sont utilisés pour estimer les différentes énergies exploitées dans un bâtiment, on cite par exemple : Athena V5 2015, Energy plus 2014, Equest 2014, IES VE 2014, ECEB-Moncaster et Symons 2013, Energy Data Book of construction-US DOE 2012, Base de données ICE 2008.

Ces outils, liés à de vastes bases de données sur les produits et les procédés sont utilisées pour compléter l'analyse de l'inventaire. Les outils les plus simples sont sous forme de feuilles de calcul, dans lequel les quantités de matériaux peuvent être saisies. Des outils plus complexes agissent plus comme un logiciel d'estimation des coûts et des quantités des matériaux et la qualité des assemblages doivent être complétée.

2.7. Conclusion

Depuis la fin du XXème siècle, les conséquences des nouveaux modes et moyens de vie, n'ont pas cessé d'affecter l'environnement. L'atmosphère n'est plus protégée par la couche d'ozone et les gaz occupant cet espace ne sont plus les mêmes. Ainsi, depuis ce temps, plusieurs efforts ont été orientés vers l'étude de ces conséquences, afin de quantifier les émissions nocives et d'évaluer les dégradations produites. Ces impacts relatifs, généralement aux activités humaines, ont été étudiés largement par plusieurs méthodes et outils inventés, pour maîtriser les émissions de gaz, de préserver les énergies en menace, de protéger l'homme ainsi que les espèces menacées par la pollution d'eau en particulier.

CHAPITRE 02 : Evaluation environnementale des matériaux.

Cette synthèse bibliographique a permis de dresser de manière non exhaustive quelques définitions, relatives à une évaluation environnementale, ces objectifs, ces étapes, ces principes, ces outils et ces constituants. En effet, cette partie du travail, a été une mise au point des différents paramètres entrants dans l'évaluation environnementale, élaborée dans le chapitre suivant.

A l'issue de ce chapitre, il a été conclu qu'une maîtrise des données nécessaire à l'évaluation, et la prise en compte des différents impacts liés à la production et l'optimisation d'un matériau avant sa conception, est la clé de réussite de son évaluation.

CHAPITRE 03

Compagne expérimental: Bétons légers caoutchoutés

3.1 Introduction

La première partie de ce travail expérimental entrepris sur les composites cimentaires, a commencé lors de la préparation du mémoire de Magister [Med11]. Le travail proposé, est une compagne expérimentale, visant à étudier l'effet de l'incorporation de 5%, 7.5% et 10% de granulats de caoutchoucs issus du broyage des pneus usagés dans les bétons légers, en substituant une fraction massique de gravier seul, ensuite le gravier et le sable conjointement.

La première partie est consacrée à la caractérisation physique, chimique et mécanique des matériaux. La deuxième partie est une caractérisation des bétons à l'état frais et durci. Les résultats expérimentaux indiquant l'influence de l'incorporation des granulats de caoutchouc, sur les différents paramètres caractérisant les bétons légers de chacune des deux compositions obtenus sont discutés.

3.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés sont de provenance locale, leurs caractéristiques sont présentées dans cette section.

3.2.1. Le ciment

L'Hydratation du ciment, lorsqu' il est mis en contact avec de l'eau, se fait selon une série de réactions chimiques associées à une libération de chaleur. Pour une hydratation complète, la quantité d'eau doit être suffisante. Cette hydratation s'effectue en plusieurs étapes ; étape de prés-induction (dure quelque minutes), étape d'induction ou période dormante(dure 2 à 3 minutes), étape du mélange (après les 3 heures), étape d'accélération (durant les neuves heures suivante), et la dernière étape de post accélération [Per03].

Le ciment utilisé dans cette recherche, provient de l'usine Oggaz (CIBA), présentant des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformément à la norme Algérienne NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94. Sa résistance à la compression à 28 jours est d'environ 42.52 MPa. D'après la fiche technique sa composition chimique est indiquée sur le tableau 3.1.

Constituant	Silicates tricalciques (C ₃ S)	Silicates bicalciques (C ₂ S)	d'Aluminate tricalcique (C ₃ A)	Aluminoferritet etracalciques (C ₄ AF)
Dosage (%)	58 à 64	12 à 18	6,0 à 8,0	10,0 à 12,0

Tableau 3.1 Constituants du ciment.

3.2.2. Les granulats

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements, en concassant différentes roches massives ou en recyclant divers déchets (bétons, pneus usés, plastique, etc,...). Selon leurs origines, ils sont destinés

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

aux usages auxquels ils conviennent. Plus de 70 % en poids du béton sont des granulats, les performances mécaniques et toutes autres propriétés, à savoir, sa durabilité, est tributaire du choix de ces granulats.

3.2.2.1. Graviers

La forme des grains et la composition granulométrique des graviers, sont relativement irrégulières, les graviers utilisés, proviennent de la carrière de HASSNAOUI à Sidi Ali Ben Youb (Sidi Bel Abbes). Ce choix est dicté, par le fait que c'est une grande carrière qui approvisionne principalement les projets de construction dans cette région. Ce sont des granulats concassés, de masse volumique réelle mesurée égale à 2700 kg/m^3 et de classe granulaire 3/8 et 8/15mm.

3.2.2.2. Sable naturel

Le sable utilisés provient de la carrière DENNOUNI, c'est un sable Siliceux de type roulé, sa classe granulaire est 0/5mm. Ce qui est constaté dans ce sable est qu'il est riche en éléments fins (mélange de fillers), ceci est due essentiellement, au faites, que la totalité des stations de concassage Algériennes, ne procèdent pas à la déffilérisation ou le lavage du sable.

3.2.2.3. Granulat et poudrette de caoutchouc

Il est difficile, de connaitre la composition exacte des pneus en raison des secrets des compagnes de leur production. Généralement, ils sont composés principalement de caoutchouc naturel et synthétique (jusqu'à 40% en poids combiné), de noir de carbone (31% en poids), Oxid de Zinc (1,9%) [The99, Tro12], d'agents de renforcement, d'accélérateurs de la vulcanisation, d'anti-ozonant, etc....

Vue le manque en entreprises spécialisées dans le déchiquetage des pneus usagés de véhicules légers, les granulats de caoutchouc utilisés dans cette étude, sont obtenus par déchiquetage manuel de pneus usés (figure 3.1) à température ambiante. La teneur en fibres des pneus déchiquetés, est d'environ 5% du poids total du pneu [Ale05]. Ils ont tendance à contenir plus de caoutchouc synthétique que de caoutchouc naturel, en plus d'un certain pourcentage d'éléments non caoutchouteux entrant dans la composition des pneumatiques, tels que le métal et/ou le textile.

Ces granulats de caoutchouc, ont été employés en remplacement partiel des granulats naturels (sable et gravier), afin que leurs propriétés s'apparenter à ces deux matériaux. Le principe de cette incorporation vise à obtenir des bétons légers, ayant un comportement proche de celui du caoutchouc.

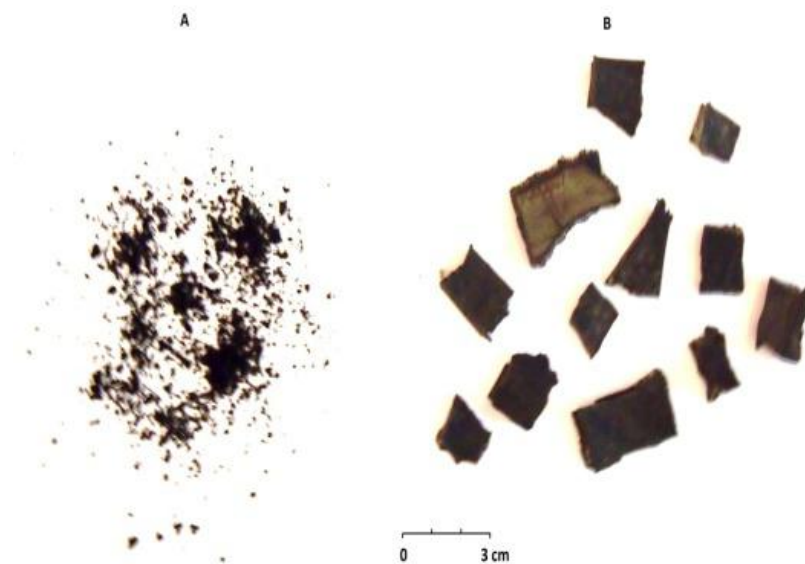


Figure 3.1 (A) Poudrette de caoutchouc, (B) granulats de caoutchouc [Med16].

3.2.3. L'eau

L'eau utilisés pour la réalisation des gâchés, est une eau potable, recueillie du robinet. Aucune analyse poussée n'a été effectuée, compte tenu qu'il s'agit d'une eau propre destinée à la consommation.

3.3 Identification des matériaux utilisés

Cette partie, caractérise les matériaux utilisés dans cette étude. Entre autres la granulométrie, la masse volumique, l'absorption d'eau, la propreté ainsi que les résistances mécaniques, sont évalués afin de prédire leurs influence sur les performances des composites cimentaires obtenus.

3.3.1. Essais et procédures

Les granulats constituent le squelette du béton et représentent environ 60% à 80% du volume du béton. Ils sont divers, même s'ils sont de même origine ; naturelles ou recyclés. Les essais sont, donc une étape indispensable pour déterminer leurs grandeurs caractéristiques.

3.3.1.1. Analyse granulométrique (NF P 18-560)

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat (NF P 18-560). Elle fait l'objet d'une représentation graphique, cette courbe représente la distribution en pourcentage des poids des matériaux passant dans le tamis et passoires de dimensions normalisées. Les classes granulaires des échantillons analysés sont:

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

- Granulats ordinaires : Sable 0/5, Gravier 3/8, Gravier 8/15.
- Granulats recyclés: Poudrette de caoutchouc 0/4, Granulats de caoutchouc de classe 3/8 et 8/15.

Les granulats de caoutchouc utilisés sont plats rugueuse, allongés ou aiguilles, ce qui rend la mise en œuvre et le malaxage difficiles. Les particules de caoutchouc, ont des surfaces planes et rugueuses. Les résultats de l'analyse granulométriques des différents granulats, sont présentés sur la figure 3.2.

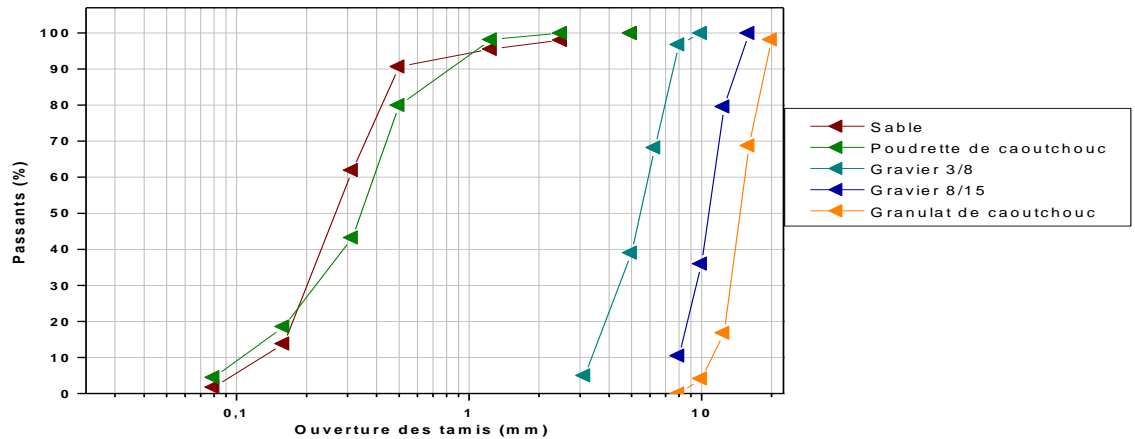


Figure 3.2 Analyse granulométrique des granulats ordinaires et artificiels [Med16].

Le pourcentage le plus élevé en poids des granulats de caoutchouc a été retenu au tamis de \varnothing 12,5 représentant 83,12%, ensuite tend à baisser progressivement dans la suite de la série avec la réduction de la taille d'ouverture. D'après la figure 3.2, il a été constaté que ces granulats, ont une répartition granulométrique légèrement différente des granulats naturels qu'ils remplacent.

3.3.1.2 Equivalent de sable (NF P 18-597)

L'essai d'équivalent de sable, a pour but d'évaluer la propreté des granulats, entrant dans la composition des bétons, en séparant les particules du sable des fines contenues dans les échantillons étudiés. Cet essai, ne différencie pas entre les fines décelées (nocives ou inertes). Selon les recommandations de la norme NF P 18-598, il peut être réalisé avec piston (Esp) ou visuellement (Esv), le rapport entre le floculat (h_1) et le sédiment (h_2), est exprimé (%):

$$ES = 100 (h_1/h_2) \quad (3.1)$$

Le résultat serait l'estimation de la quantité de fines susceptibles d'être libérées dans le mélange lors du gâchage (Tableau 3.2).

Sable 0/5	ES=100*(h_2/h_1)		ES moy (%)
	Esv	Esp	
	Esv	73,33	74,08
		74,84	
	Esp	61,43	62,20
		62,98	
		75,47	

Tableau 3.2 Equivalent de Sable des granulats ordinaires.

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

D'après cet essai, l'équivalent de sable est d'environ 68%, représentant la moyenne de trois résultats, le sable utilisé est donc, légèrement argileux, de propreté admissible pour des bétons de qualité courante.

3.3.1.3. Module de finesse (Norme 18-540) :

L'utilisation des sables à teneur élevée en fillers est plutôt recommandée dans des normes européennes relatives aux granulats pour le béton ou le mortier, et permettent jusqu'à 22% de fillers en masse des composants. Mais les formulations actuelles ne permettent pas d'appréhender leurs effets pour optimiser le mélange granulaire [Aac09].

A un pourcentage élevé, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton, tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place du mélange difficile. Le caractère plus au moins fin d'un sable pour béton, peut être quantifié par le calcul du module de finesse (Mf). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis, ayant les modules 23, 26, 29, 32, 35 et 38. La norme française (Norme 18-540) indique que (Mf) doit être compris entre 1,8 et 3,2.

Pour $1,8 < Mf < 2,2$: l'ouvrabilité est avantagée au détriment de la résistance mécanique, c'est-à-dire il est plus maniable que résistant;

Pour $2,2 < Mf < 2,8$: l'ouvrabilité et la résistance s'avèrent satisfaisantes,

Pour $2,8 < Mf < 3,2$: une bonne résistance mécanique et une meilleure maniabilité.

Le module de finesse du sable utilisé est de l'ordre de 1,40, c'est un sable riche en éléments fins. Il a été évité de le lavé, pour se rapprocher le plus des conditions de construction dans les chantiers.

3.3.1.4. Masse volumique (NF P 18-554)

La masse volumique, est la caractéristique de base des granulats pour les bétons en général. Elle affecte leurs performances. Les granulats proposées dans le marché de la construction sont très hétérogènes même s'ils sont de la même catégorie, vu la diversité de leurs origines et leurs modes de fabrications, les données relatives aux caractéristiques, qui sont fournies par les fabricants, sont une moyenne pouvant plus ou moins s'écarter des échantillons mis à la disposition du constructeur.

Les masses volumiques absolues ou apparentes, ont été mesurées conformément à la norme NF P 18-554, cette dernière a été appliquée sur les granulats naturels et recyclés. En ce qui concerne les granulats en caoutchouc, un pycnomètre à gaz est indispensable pour la détermination de sa masse volumique absolue.

Types de granulats		Mv_{app} (g/cm ³)	Mv_{abs} (g/cm ³)
Sable 0/5		1,33	2,50
Gravier	3/8	1,60	2,56
	8/15	1,673	2,68
Caoutchouc		1,11	-

Tableau 3.3 Masse volumiques apparentes et absolues des granulats.

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

Après avoir examiné les granulats de caoutchouc par plusieurs chercheurs, les résultats de la masse volumique, convergent vers les résultats trouvés dans le travail de recherche de Banaazouk et al. [Ben07]. Par rapport à d'autres chercheurs, ces résultats sont légèrement différents. Les écarts observés, peuvent être dus, à l'origine de la gomme de caoutchouc mise à l'essai, ainsi que le type de pneus (véhicule léger ou lourd). Le tableau présente les masses volumiques données par quelques chercheurs. Fattuhi et al., suggèrent que la variation de la densité qualité du caoutchouc qui est variable ou à des erreurs dans les procédures expérimentale [Fat96].

Auteurs	Année	Masse volumique du caoutchouc (g/cm ³)
Eldin et Senouci [Eld93]	1993	0,8 à 0,96
Ali et al. [Ali93]	1993	1,06 à 1,09
Rostami et al. [Ros93]	1993	0,8
Topçu [Top95]	1995	0,65
Khatib et al. [Kha99]	1999	1,12
Hernandez-Olivares et al. [Her04]	2004	0,84
Bignozzi et al. [Big06]	2006	0,9
Benazzouk et al. [Ben07]	2007	0,43
Turatizine et al. [Tur07]	2007	1,2
Khaloo et al. [Kha08]	2008	1,15
Aeillo [Aei10]	2010	1,089± 0,36

Tableau 3.4 Masse volumique des granulats du caoutchouc.

3.3.1.5. Absorption d'eau (NF P 18 554-555)

L'absorption est une propriété importante pour la maîtrise de la rhéologie des composites cimentaires. Une partie du volume de l'eau de gâchage, est absorbée par les granulats, en particulier si ses granulats sont stockés dans une atmosphère. Les mesures du coefficient d'absorption (A_b) selon la norme NF P 18-555, consiste à réaliser des pesées hydrostatiques des granulats. Il est préférable de prendre en compte l'absorption d'eau mesurée durant la première heure qui suit l'immersion. Le coefficient d'absorption est calculé à partir de la formule:

$$A_b = 100 (M_a - M_s) / M_s \quad (3.2)$$

A_b : coefficient d'absorption des granulats

M_a : masse de l'échantillon après immersion de 24 h

M_s : masse de l'échantillon sec.

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

La présence des pores internes dans les granulats, leurs caractéristiques et leur imperméabilité, sont en rapport direct avec leur absorption d'eau. En général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pas d'eau.

Type de granulat		Coefficient d'absorption Ab (%)
graviers	3/8	0,88 < 2,5
	8/15	1,04 < 2,5
Granulats caoutchouc Poudrette de caoutchouc		0,07 < 2,5

Tableau 3.5 Coefficients d'absorption (Ab) des granulats ordinaires et artificiels.

Le coefficient d'absorption (Ab), influence aussi la liaison des granulats avec la pâte de ciment hydraté, leur stabilité chimique, leur résistance à l'abrasion ainsi que la résistance du béton au gel/dégel. Un coefficient d'absorption plus élevé, affecte la durabilité des bétons, il sont facilement, carbonatés, pénétrés par l'eau et les chlorures et dégradés par le gel [Ben01]. Ainsi, un coefficient (Ab) plus petit est aussi nuisible à la maniabilité du béton frais, de tels granulats nécessitent un pré-mouillage.

3.3.1.6 Résistance des granulats à la fragmentation (NF P 18-573)

Il faut noter que la résistance mécanique du béton est étroitement liée à la résistance mécanique des graviers. A l'exception des bétons à hautes performances, le résultat de ce type d'essai, intervient peu sur les caractéristiques des bétons. Il faut noter que, pendant le malaxage la granularité risque d'évoluer différemment suite à l'usure produite par la fragmentation, ce qui modifie les propriétés des mélanges.

Type de granulat		Coefficient Los Angeles (%)	Observations
graviers	3/8	25,9	15 < LA < 100.
	8/15	26,31	

Tableau 3.6 Essai Los-Angeles des granulats ordinaires.

D'après les résultats, figurant sur le tableau ci-dessus (tableau 3.6) et selon la norme su-citée, il y a possibilité de présence du calcaire dans les graviers puisque: $15 < LA < 100$.

3.4 Composition des bétons

Etablir la composition d'un béton, consiste à déterminer les bonnes proportions des divers de granulats, de ciment, et d'eau a mettre dans un mètre cube de béton, car les caractéristiques que le béton acquiert à sa maturité dépendent de la nature de ses constituants. Pour de nombreux auteurs, le principe de détermination de ces proportions, lorsqu' il s'agit de confectionner des bétons de granulats légers, est pratiquement le même que celui concernant les bétons traditionnels.

En effet, aucune méthode de composition ne permet d'obtenir directement par analyse et

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

manipulation algébrique une formulation finale. La méthode choisie permet simplement d'établir une formulation de départ, pouvant convenir aux propriétés recherchées, et devra être optimisée par des essais en laboratoire [Dre83].

L'étude du béton léger incorporant les granulats en caoutchouc consiste à définir la composition granulaire et le dosage optimal, permettant d'atteindre les propriétés du béton léger recherchées [Mar00]. A l'exception des granulats de caoutchouc, les constituants et les méthodes de formulation utilisés sont les mêmes que pour les bétons légers classiques, à partir du dosage optimal pratique (tableau 3.7), le programme expérimental propose de faire varier les quantités de caoutchouc employé.

Les bétons légers, obtenus par substitution partielle des granulats naturels du gravier et/ou sable, ont été formulés à un rapport Eau/Ciment fixe (0.5), correspondant à un affaissement normal. Les bétons légers caoutchoutés ont été comparés à un béton de référence sans caoutchouc.

La composition des bétons légers de cette étude, a été inspirée de la littérature de telle façon à permettre un futur travail analytique. Plus de 60 méthodes d'essai pour la mesure de l'ouvrabilité du béton ont été développés pour un seul projet ou pour une application spécifique et ont été peu rapportés dans la littérature [Koe03].

Dans ce travail de recherche qui a été limité à l'étude des bétons légers, on a opté les taux de substitution massique des granulats naturels (graviers et sable) par des granulats de caoutchouc: 5%, 7,5% et 10%.

Bétons légers	Matériaux (kg/m ³)					
	Eau (l)	Ciment	Granulat Caoutchouc	Poudrette caoutchouc	Sable	Gravier
Béton _{Réf}	190	380	0	0	858	927
BCg5	190	380	46,4	0	858	880,6
BCg7,5	190	380	69,5	0	858	857,5
BCg10	190	380	93	0	858	834
BCm5	190	380	46,4	42,9	815	884
BCm7,5	190	380	69,5	64,35	793,65	851
BCm10	190	380	93	85,8	772,2	839

Tableau 3.7 Composition de 1 m³ des bétons léger de l'étude [Med16; Med17].

Pour faciliter la lecture de cette recherche, les bétons légers ont été identifiés par le taux et le type de substitution. Pour l'ensemble des bétons légers caoutchoutés, les deux premières lettres (BC) ont été choisit, dont B indique Béton et C indique Caoutchouc. Pour chacun des mélanges étudiés, ces deux lettres sont suivies par une autre lettre, indiquant le type de substitution; (g) signifie que le gravier a été substitué, alors que (m) signifie que le sable et le gravier ont été substitués à la fois (substitution mixte). Le nombre qui suit ces trois lettres dans chaque béton léger caoutchouté, désigne le taux de la substitution effectuée. Par exemple, (BCg5) désigne le béton léger incorporant 5% des granulats de caoutchouc en remplacement du gravier et (BCm7,5) désigne le béton léger incorporant 7,5% des granulats et de poudrette de caoutchouc en remplacement partiel du gravier et du sable.

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

Le malaxage a été réalisé dans une bétonnière de type B154 (BITOMIX), assurant le mélange des constituants par rotation de la cuve, cette dernière a été humidifiée, avant l'introduction des matériaux dans l'ordre suivant: les graviers, les granulats en caoutchouc, le sable, la poudrette en caoutchouc et le ciment. Le malaxage a été effectué à sec a duré deux (02) minutes avant l'introduction de l'eau. Ensuite le malaxage a été continué pendant trois autres minutes.

Pour la confection des éprouvettes misent aux essais: les parois intérieures des moules ont été lubrifiées, avant leur remplissage, pour éviter toute cohésion de la pâte. Après l'homogénéisation, des matériaux frais, le remplissage des éprouvettes se fait en deux couches vibrées pendant sept (07) secondes pour les éprouvettes cylindriques et 4 secondes pour les éprouvettes prismatiques, afin d'homogénéiser les mélanges.

La norme NF P18-404, fixe les conditions de conservation des éprouvettes destinées pour les tests à la compression: les vingt quatre premières heures, elles ont été maintenues à l'air ambiant. Toutes les extrémités des éprouvettes cylindriques sont surfacées avec du soufre avant l'essai selon le procédé indiqué dans la norme NF P18-416, afin d'obtenir des surfaces planes et perpendiculaires aux génératrices des éprouvettes.

Des éprouvettes de chaque béton léger de chacune des deux compositions, ont été confectionnées. Six (06) éprouvettes cylindriques de dimensions (\emptyset 16 x 32 cm), douze éprouvettes prismatiques de dimensions (10 x 10 x 40 cm) et six éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16 cm), ont été soumises aux essais à l'états durcis. Les échantillons ont été préparés et conservés en salle de conservation à température ($20 \pm 2^\circ\text{C}$), pendant 28 jours. Avant les essais, les éprouvettes ont été séchées dans une étuve à $70 \pm 2^\circ\text{C}$.

3.5 Caractérisation des bétons légers à l'état frais

Les essais à l'état frais, sont obligatoires pour la connaissance des mélanges modifiés par incorporation des granulats en caoutchouc. Ces essais peuvent décrire leur comportement lors de leur mise en œuvre. Le prélèvement des échantillons mis aux essais a été effectué conformément à la norme NF P 18-437.

3.5.1 Mesure de l'ouvrabilité (Essai au cône d'Abrams) (NF P 18-451)

Les indices décrivant la rhéologie des mélanges cimentaires à l'état frais, sont multiples, l'affaissement au cône d'Abrams, a été choisit pour évaluer l'ouvrabilité des bétons légers testés. Cet essai, est connu universellement, il permet de mesurer la consistance. Dans cette étude, il a été effectué conformément aux prescriptions de la norme citée ci-dessus.

Le cône tronconique à une hauteur de 30cm, placé sur une surface métallique lisse, serrée avec des écrous, la petite ouverture vers le haut. Le remplissage du moule a été effectué en trois couches d'égal volume. Chaque couche, a été piquée 25 fois avec une tige métallique ayant des dimensions standard. Une fois le cône rempli, le béton léger en excès à la surface a été arasé, en se servant de la même tige. A la fin, le cône est relevé lentement, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône, est appelée

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

l'affaissement, exprimé en cm.

3.5.2 Mesure de la teneur en air occlus (NF P18-443)

Même si tout béton ouvrable contient suffisamment d'eau pour remplir les vides du squelette solide, il existe toujours un certain volume d'air. L'évaluation quantitative de l'air occlus, sert non seulement à connaître la composition exacte d'une unité de volume de béton mis en place, mais elle permet aussi de prédire les propriétés mécaniques du béton durci. L'air occlus, affecte en effet la résistance à la compression, au même titre que l'eau.

Le seul élément compressible dans un béton frais est l'air, c'est pour cette raison, que la méthode préssiométrique, est la méthode la plus fiable et la plus précise [Bar92a] pour le mesurer par rapport aux méthodes gravimétriques et volumétriques. Son principe, est fondé sur la relation entre le volume d'air et la pression appliquée.

Cet essai a été réalisé à l'aide d'un Aéromètre, qui indique directement le pourcentage de la teneur en air occlus. Les procédures de cette méthode, consiste essentiellement à observer la diminution de volume d'un échantillon de béton comprimé, lorsqu'il est soumis à une pression connue.

3.5.3 Mesure de la masse volumique à l'état frais (NF P18-440)

La masse volumique, est un paramètre important pour les composites cimentaires, caractérisés par leurs faibles masses volumiques, sa détermination est donc essentielle. Les mesures ont été effectuées conformément à la norme NF P18-440.

La méthode consiste à remplir le bol (bol de l'Aéromètre par exemple), en trois couches égales et à donner 25 coups avec la tige de picage à chacune des couches. Une fois rempli et nettoyé, il a été pesé pour déterminer la masse du béton. La masse volumique est donnée par le rapport de la masse du béton et le volume du bol.

3.5.4 Mesure du ressuage et de la ségrégation des bétons légers

Lors de leur mise en œuvre, les composites cimentaires sont soumis à différentes sollicitations. Dans un premier temps, le matériau doit s'écouler, pour épouser les formes du coffrage, comme il doit passer à travers les armatures, quelques soit leurs densités. Après cette étape, d'autres forces le sollicitent, telle que la gravité qui diffère d'un composant à un autre, auquel il répond différemment, pour préserver son aspect homogène et afin d'éviter sa ségrégation.

L'étude préliminaire des composites cimentaires est nécessaire, afin de prévoir avant la réalisation, leur homogénéité au moment et après leur mise en œuvre. De différents essais, sont à la disposition du constructeur pour une éventuelle vérification et caractérisation, afin d'étudier les phénomènes produisant un tel problème, selon la particularité de chaque composite cimentaire.

CHAPITRE 03 : Campagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

Plusieurs essais ont été utilisés pour tester la ségrégation des bétons, Tregger et al., ont effectué un essai d'écoulement, dont la ségrégation a été discutées selon les diamètres de répartition des granulats autour d'un noyau (le centre de l'échantillon testé) [Tre12]. Perrot et al. [Per12], ont réalisé un essai d'affaissement pour évaluer la résistance au ressuage à l'eau des bétons auto-plaçant, ils ont mis les échantillons dans un tube cylindrique de diamètre 30 mm de hauteur et 450 mm. Récemment, Farhan et al., ont adapté la méthodologie d'Erdem (2014), basée sur une analyse d'image en utilisant le logiciel Image J, afin d'évaluer la ségrégation du caoutchouc. Cette méthode évalue, quantitativement, la ségrégation à la fois horizontalement et verticalement dans les échantillons de béton. La capture des images binaires, le long de la hauteur de l'échantillon, ont permis d'estimer le volume du caoutchouc total dans les moitiés supérieure et inférieure [Far16].

Dans cette étude, la vitesse de ressuage et la ségrégation, ont été quantifiés suivant la méthode décrite par Xie et al. [Xie13]. Un échantillon de béton de 3000 ml a été placé dans un récipient ayant 15 cm de diamètre et 30 cm de hauteur. Le béton a été agité dix (10) fois par un agitateur et la surface était flattée. Le récipient a été déposé par la suite sur une surface, immobile pendant 30 min. A l'aide d'une burette, l'eau de ressuage, a été récupéré à partir de la surface des échantillons. Pour quantifier le volume, une éprouvette graduée de 5ml est utilisée. Les deux portions des échantillons se situant à 1000ml en haut et en bas du récipient sont récupérés, le mortier et sable ont été lavé et la masse du gravier pesée.

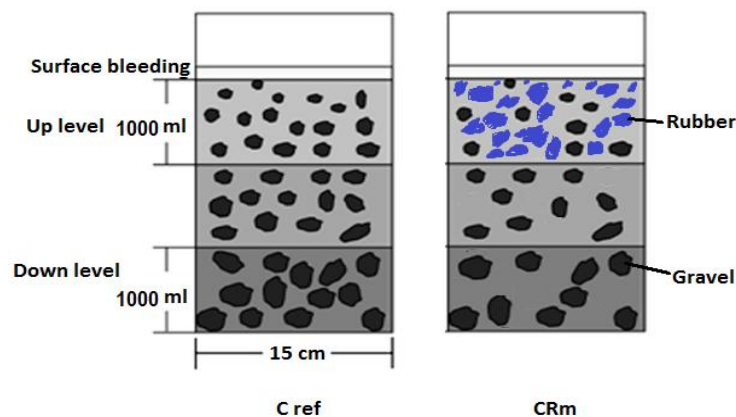


Figure 3.3 Schéma d'échantillon de 3000 ml d'un béton de référence et un béton léger caoutchouté [Med16].

Le paramètre de ressuage (B) est défini dans la relation :

$$B = \frac{V_b}{V_w} 100 \quad (3.3)$$

Avec:

V_b : le volume de ressuage en surface.

V_w : Volume d'eau dans l'échantillon.

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

Le paramètre de la ségrégation V est défini par la relation (3.4) :

$$V = \frac{m_2}{m_1} \quad (3.4)$$

Avec:

m_2 : la masse du gravier du niveau inférieur

m_1 : la masse du gravier du niveau supérieur.

Medine et al., ont démontré qu'étant donné que la densité du caoutchouc est d'environ 0,92 (inférieur à 1), la poudrette et les granulats de caoutchouc, se sont concentrés au niveau haut (Figure 3.3). Pour cela, pour le béton incorporant le caoutchouc, l'équation (3.3) est modifiée comme indiqué dans l'équation (3.4). Le paramètre de ségrégation devra être calculer par la somme des paramètres de ségrégation du gravier et des agrégats de caoutchouc.

$$V' = \frac{m_2.m'1 + m_1.m'2}{m_1.m'1} \quad (3.5)$$

Avec :

m_2 et $m'2$: masses du caoutchouc et du gravier du niveau inferieur

m_1 et $m'1$: masses du caoutchouc et du gravier du niveau supérieur.

Auteurs	Equations (3.6, 3.7 et 3.8)
Hu et al. [Hu96]	$\tau_0 = \frac{\rho}{270}(300 - s)$ <p>τ_0 : Contraintes en Pa, s : Affaissement en mm, ρ : densité en kg/m^3</p>
Ferraris et al. [Fer98]	$\tau_0 = \frac{\rho}{347}(300 - s) + 212$
Murata et al. [Mur92]	$\tau_0 = 714 - 473 \log(s)$ <p>τ_0 : Contrainte en Pa s : Affaissement en cm</p>

Tableau 3.8 Expressions de la limite d'écoulement.

Hu et al., ont développé une expression pour les contraintes d'écoulement et de densité, comme il a

CHAPITRE 03 : Campagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

été indiqué dans l'équation (3.6). Ferraris et al., ont modifié l'équation (3.6 en 3.7) [Tou06 ; Hu96 ; Fer98]. Murata et al., ont développé une équation empirique pour les contraintes d'écoulement des bétons, tel qu'il est indiqué dans l'équation (3.8) [Mur92]. Le Tableau 3.8 résume les équations de la contrainte d'écoulement.

La figure (3.4), montre les forces exercées sur le caoutchouc et les graviers dans le béton léger, le rapport G_1/G_2 est supérieur à 2, donc, la gravité a tendance à faire descendre les graviers vers le bas qui sont freinés par le mortier, qui est luttés par le mortier, enfin l'équilibre est atteint pour former la distribution des granulats, c'est le processus de la ségrégation. Spangenberg et al., ont étudié les schémas de migration globales pendant le coulage du béton fluide et la distribution des granulats, relatives aux paramètres rhéologiques. La vitesse de la descente est très lente, donc l'impact de la viscosité sur la ségrégation n'est pas évident. D'autre part, la ségrégation est le résultat de la gravité d'un granulat surmontant la contrainte de cisaillement du mortier à une vitesse très lente, la ségrégation est dominée par la contrainte d'écoulement [Spa12].

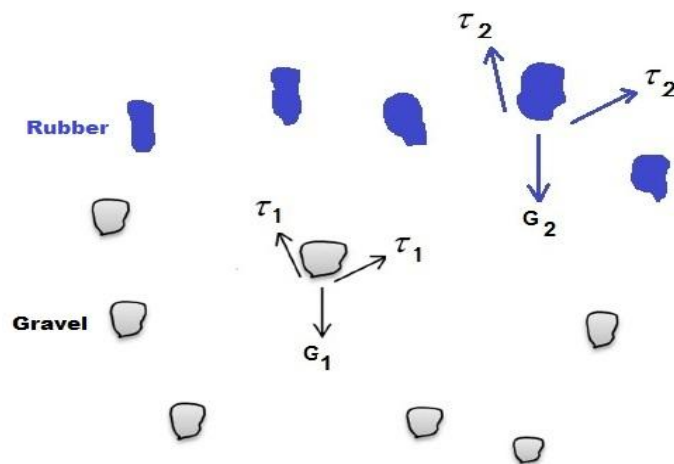


Figure 3.4 Gravité des graviers et des granulats de caoutchouc [Med16]

La ségrégation dépend de la viscosité du matériau. En effet, d'après Noguchi et al. [Nog], la viscosité du fluide doit être suffisante pour entraîner les granulats lors de l'écoulement, par ailleurs, elle doit être relativement faible pour que le béton s'écoule avec un débit important, mais elle doit être aussi, suffisante pour résister au cisaillement généré par le déplacement des granulats lors de l'écoulement [Bet05].

3.5.5 Mesure de la compactibilité (NF P 18-431)

La compactibilité est l'aptitude au façonnage d'un échantillon du béton frais [Ago06 ; Gou98], avec un degré suffisant de consolidation. La mise en place, pourrait être traitée grâce aux concepts rhéologiques, puisque modifier la forme d'un volume donné s'apparente surtout, dans le cas du béton lors du processus du coulage. Il serait alors utile, dans une certaine mesure, d'établir un critère de compactibilité à partir d'un essai au laboratoire. Le teste permettant de mesurer ce paramètre, a été développé au cours de l'année 1960

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

en Allemagne [Gu213].

L'appareil d'essai, est extrêmement simple, elle est constituée d'un conteneur rigide métallique de hauteur 400 mm avec une dimension latérale de 200 mm. Le récipient doit être rempli de béton frais sans compactage, le matériau en excès, doit être éliminé de la surface en l'arasant à l'aide d'une règle. Le béton est ensuite, compacté en utilisant un vibreur fonctionnant à une fréquence spécifiée, jusqu'à ce que le volume ne change plus. La distance entre la partie supérieure du béton et la partie supérieure du récipient (S), est mesurée aux quatre coins du conteneur. Le degré de compactage est calculé comme la hauteur du récipient (h_1) divisé par la hauteur moyenne du béton compacté. Les résultats de ce test, ont été évalués et discutés suivant le tableau ci-dessus (tableau 3.9).

Classe de compactage	C_0	C_1	C_2	C_3
$h_1 / (h_1 - S)$	$\geq 1,46$	1,45 à 1,26	1,25 à 1,11	1,10 à 1,04

Tableau 3.9 Classes de compactage en fonction du degré de compactibilité.

3.6 Caractérisation mécanique des bétons légers durcis

A l'échelle millimétrique ou centimétrique, présentent souvent des cavités (bulles d'air dans la pâte de ciment par exemple) et des inclusions plus ou moins rigides (granulats du béton), qui peuvent modifier leurs performances (figure 3.5). Le processus de dégradation, passe par plusieurs étapes, la nucléation de fissures à partir des hétérogénéités, l'aggravation de ces fissures pouvant aboutir finalement à la coalescence et la ruine de la structure [Lar99].

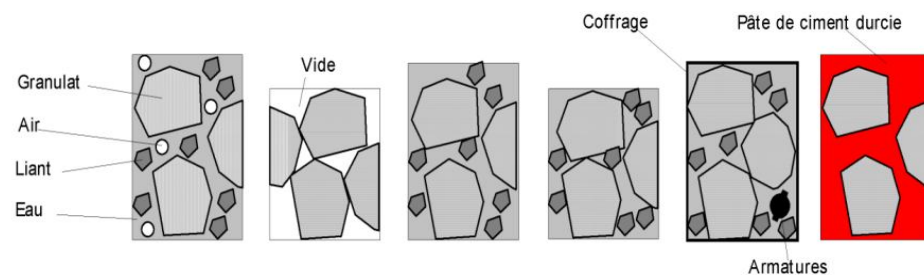


Figure 3.5 Structures granulaires et formulation des bétons durcis [Lar99]

L'étude expérimentale, se poursuit par la mise au point du comportement mécanique des différents bétons légers présentés précédemment. Le choix des tests effectués, est guidé par l'analyse que l'on souhaite faire de l'influence de ces granulats sur la qualité du béton léger durci. La masse volumique à l'état durci, la résistance à la compression et à la traction, ainsi que les propriétés acoustiques, ont été évalués dans cette partie du travail.

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

3.6.1 Mesure de la masse volumique des bétons légers durcis (NF P 18-435)

En se référant à la norme NF P 18-435, les masses volumiques à l'état durci des bétons légers élaborés dans cette recherche, sont calculée à partir de leurs états de réception, les échantillons ont été pesés à une précision de l'ordre de 0,1%.

3.6.2 Mesure de la résistance à la compression (NF P 18-455)

La résistance à la compression, est l'un des facteurs essentiels, pour juger la réussite de la valorisation, puisque elle est une exigence principale, pour la stabilité des structures, cette propriété doit être définie et spécifiée attentivement.

Selon la norme NF P 18-455, l'essai consiste à rompre entre les plateaux d'une presse hydraulique, à vitesse constante des éprouvettes cylindriques de dimensions (\emptyset 16 x 32 cm). La presse utilisée dans le cadre de cette étude, a une capacité de l'ordre de 2000kN. Les éprouvettes doivent être bien centrées entre les deux plateaux, afin d'éviter l'apparition des moments dus à l'excentricité de la charge de compression (norme NF P 18-406). Les charges de rupture, sont indiquées sur la presse, elles sont converties en résistance à la compression (F_c), suivant la relation (3.9)

$$F_c = F / A_c \quad (3.9)$$

Avec :

F_c : Résistance à la compression

F : L'effort enregistré au moment de la rupture de l'éprouvette

A_c : La section de l'éprouvette.

3.6.3 Mesure de la résistance à la traction par flexion (NF P 18-407)

La caractérisation des bétons durcis en général, passe avant tout par la détermination de sa résistance à la traction, auquel il est soumis dès sa mise en service et durant le long de son cycle de vie. L'essai mesurant cette résistance, est réalisé sur des éprouvettes prismatiques normalisées (figure 3.6), de dimensions (10x10x40 cm), préparées conformément à la norme NF P 18-400. La résistance à la traction par flexion (F_t), est obtenue en appliquant la formule de la résistance des matériaux (3.10):

$$F_t = 1,8 F/a^2 \quad (3.10)$$

Avec :

F_t : Charge maximale en DaN.

F : Effort enregistré au moment de la rupture de l'éprouvette

a : Cote de l'éprouvette.



Figure 3.6 Epreuves prismatique soumises aux essais de traction par flexion en 04 points à 28 jours [Med11].

3.6.4 Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonore (NF P 18-418)

L'objectif principal des méthodes non destructives appliquées au béton, est de fournir une évaluation correcte de la qualité de la structure du matériau, quelque soient son âge et son état de dégradation [Kou89]. Ainsi, elle fournit, un moyen fiable, rapide, sûre, peu coûteux et non invasif, permettant l'estimation des propriétés et offre la possibilité de contrôle direct de la qualité, pour des constructions en béton saines ou endommagées par le séisme, la fatigue, l'incendie ou d'autres scénarios catastrophiques [Elv73; Bun82], en raison de la simplicité de son emploi et de son coût raisonnable [Per93].

Evidemment, cette méthode est applicable aussi au laboratoire, elle nécessite des mesures de la vitesse d'impulsion du son. Pour évaluer les propriétés d'isolation acoustique des bétons légers caoutchoutés, les vitesses d'impulsion ont été mesurées par la méthode de transmission directe. L'appareil utilisé, est composé de trois parties comprenant, un transducteur, un récepteur et un écran digital, pour noter les mesures au moment de leurs stabilisations (figure 3.7).

Les éprouvettes ont été préparées, par sciage d'éprouvettes prismatiques, perpendiculairement à leurs génératrices, quinze jours (15) après leur durcissement pour former des échantillons de dimensions d'environ (10x10x5cm). Ces éprouvettes, ont été conservées dans des conditions normales (température et humidité ambiantes), pour éviter les effets de la teneur en eau susceptibles de varier d'un échantillon à un autre, ils ont été séchés dans une étuve à 40°C, pendant 10 jours, jusqu'à stabilisation du poids.

Leurs surfaces doivent être, enduites d'un agent de couplages tels que l'eau, graisse, l'huile ou d'autres matériaux visqueux, comme la vaseline utilisée dans cette étude, afin d'assurer une bonne transmission des impulsions et afin d'éviter les ondes parasites. Le transducteur électro-acoustique, mis en contact avec une surface génère des impulsions d'ondes longitudinales à des fréquences spécifiques. Après avoir traversé à travers le matériau, les impulsions sont reçues et converties en énergie électrique par un

CHAPITRE 03 : Campagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

second transducteur. Il est à noter que, le calibrage de l'appareil avant chaque tentative de mesure, afin de garantir la fiabilité des résultats.



Figure 3.7 Essai ultrasonique sur éprouvettes de béton léger caoutchouté.

Chaque éprouvette, a subi l'essai à trois endroits distincts au moins. L'objectif de ces essais, a été d'obtenir le maximum d'informations sur la qualité de la structure de ces nouveaux mélanges. Dans la mesure où l'on s'intéresse essentiellement à la durabilité du matériau, la zone inspectée correspond aux premiers centimètres sous la surface de la structure. Les défauts à quantifier se présentent alors sous forme de pores et de microfissures réparties dans cette zone.

Les vitesses différentes quelques fois, à quelques dizaines de millimètres de la même lecture. Ces différences, dans les mesures de vitesses indiquent un changement de la structure des matériaux auscultés. Hussin et al., ont schématiser les différentes situations pouvant se présentées lors d'un essai ultrasonique effectué sur un échantillon en béton (figure 3.11). La quantité de réduction dépend de la largeur de la fissure ainsi que si la fissure est rempli avec de l'eau ou de débris. Si la fissure est très étroite avec des côtés pratiquement touchée ou remplis d'eau et/ou de débris, l'onde ultrasonique à travers elle à une vitesse légèrement réduite et difficilement mesurée [Hus].

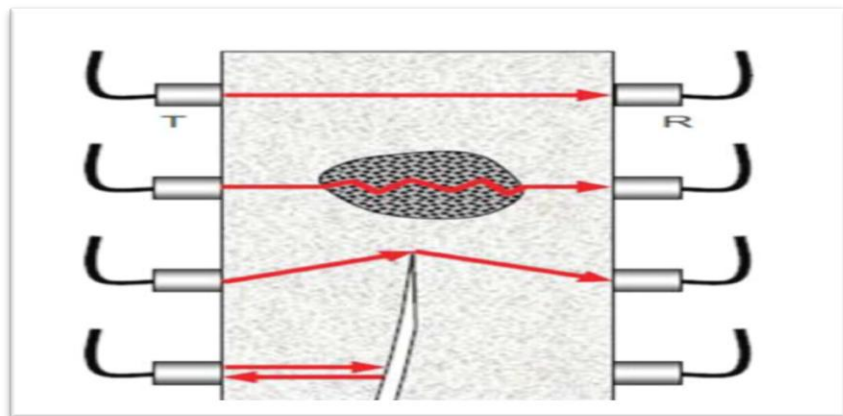


Figure 3.8 Différents chemins de passage d'une onde sonore dans un matériau (T: Transducteur, R : Récepteur) [Hus]

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

D'après la figure 3.8, à la partie supérieure, le chemin le plus haut, le chemin traversant l'élément en béton entre les deux transducteurs et le temps de passage seront les plus courts. Juste en bas dans le cas où il ya une poche ou un pore interne, l'onde est dispersée, le trajet et le temps de passage seront plus long. Dans le cas du chemin juste en dessous coïncidant le bord de la fissure, l'onde ne peut pas traverser et elle passe de l'émetteur au récepteur par diffraction du bord de la fissure. Le chemin dans la partie inférieure de la même figure, l'onde est complètement réfléchi par la fissure et le temps de passage ne peut être mesuré.

A l'issu de cette cure, les testes ultrasoniques ont été effectués, la vitesse d'impulsion a été calculée par la formule (3.11):

$$V = \frac{L}{T} \quad (3.11)$$

Avec :

V : Vitesse du son, en (m/s)

L : La longueur du parcourt, en (m)

T : Temps de parcourt de la longueur, en (s)

Les résultats seront discutés suivant le tableau ci-dessous.

Vitesses (m/s)	Qualité du béton
Plus de 4570	Excellente
3660 à 4570	Globalement bonne
3050 à 3660	Discutable
2130 à 3050	Globalement mauvaise
Moins de 2130	Très mauvaise

Tableau 3.10 Qualité du béton selon la vitesse des ondes ultrasonores [Car03].

Ce test a été mené aussi, pour déterminer le module d'élasticité des bétons légers étudiés. Idéalement, le module d'élasticité est mesuré directement sur des échantillons de béton sous compression par enregistrement de la courbe charge-déformation, mais d'un point de vue expérimental, ce n'est pas toujours facile [Dem05]. Il a été démontré, qu'il est possible de mesurer ce module, en utilisant des méthodes de contrôle non destructif établies sur la base de la propagation des ondes soniques [Pan11;Top07a]. Ce procédé de mesure, a été développé dans les États-Unis en 1938 [Pop94]. Par cette méthode de mesure de vitesse d'impulsion, il est possible de tester différentes tailles et types d'échantillons, aussi bien en laboratoire ou sur terrain.

Les valeurs des vitesses d'impulsion ultrasonique des bétons légers, ont été déterminées à 28 jours sur des échantillons de cube de (15 x 5 x 5 cm). Le module d'élasticité du béton a été calculé à partir de ces vitesses, en utilisant la formule (3.12) [Agh13]:

$$E = \frac{\rho V^2 (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (3.12)$$

Avec

E: module d'élasticité dynamique du béton (MPa)

ρ : densité du béton durci (kg/m³)

V: (km/s)

ν : coefficient de Poisson.

La particularité des mélanges étudiés, est leurs compositions formées de plusieurs phases. Le coefficient de Poisson de béton se situe entre 0,10 et 0,21 [How91; Ger07]. Dans ce travail, ce coefficient est supposé être 0,20 [Ben16].

3.7. Résultats et discussions

3.7.1. Propriétés des bétons légers à l'état frais

Dans cette section, les résultats relatifs aux bétons légers frais, sont discutés.

3.7.1.1. Ouvrabilité des bétons légers frais

L'évaluation de l'ouvrabilité des bétons légers de cette étude, est faite à travers les mesures de l'affaissement effectuée à la fin du malaxage. Conformément, aux études antérieures, il a été constaté que l'aptitude de façonnage de ces matériaux a changé. Selon la figure ci-dessous (figure 3.9), présentant les variations de l'affaissement des deux compositions (BCg et BCm), en fonction du taux de remplacement des granulats naturels, l'affaissement enregistre des valeurs inférieures à celle enregistrée (5cm) pour le béton de référence, ces valeurs correspondaient à un béton ferme, nécessitant de l'énergie pour sa mise en place. Il a été noté que l'ajout de granulats de caoutchouc a réduit l'ouvrabilité des mélanges étudiés. Ceci a été justifié par la particularité de la forme et de la texture des granulats de caoutchouc.

Dans des travaux similaire en principe de substitution, plusieurs chercheurs ont constaté la même chose [Koe03; Gar07; Gun04].

Il a été remarqué, que le béton de référence été plus maniable que le reste des bétons légers étudiés, on a également remarqué que les bétons légers incorporant conjointement les granulats et de la poudrette de caoutchouc (BCm), étaient moins maniables que ceux de la composition incorporant les gros granulats de caoutchouc (BCg). Si on prend en considération, la teneur en caoutchouc des bétons légers de l'étude, nous pouvons confirmer qu'elle a été étroitement liée à l'ouvrabilité de ces composites. On remarque qu'un taux d'incorporation des granulats de caoutchouc plus important, correspond à une ouvrabilité moins importante dans le cas des deux compositions étudiées.

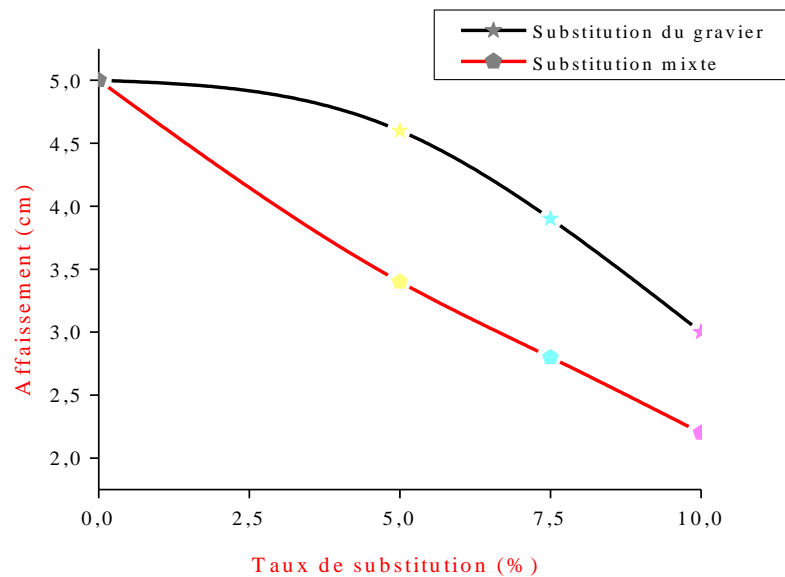


Figure 3.9 Affaissement des bétons légers en fonction du taux de substitution [Med16].

Plusieurs chercheurs, ont montré une amélioration de l'aptitude au façonnage et de l'ouvrabilité des mélanges de béton [Ant14 ; Par13], ces études ne peuvent être jugées contradictoire, du faite que les proportions du caoutchouc granulaire ainsi que les compositions ne sont pas les mêmes.

Dans cette étude, le rapport $E/C=0,5$ a été maintenu constant, pour exclure l'effet de la teneur en eau afin et cerner, par conséquent, éviter d'associer les effets du changement de ce rapport aux effets de l'inclusion des granulats de caoutchouc dans les bétons légers testés. Cependant, les résultats ont été obtenus pour la même teneur en eau, la quantité du liant a été invariable dans toutes les compositions, donc les modifications d'ouvrabilité des mélanges n'étaient tributaires que du dosage en caoutchouc.

L'examen des différents résultats, de la présente recherche et ceux de la littérature, a révélé que l'inclusion du caoutchouc sous forme de granulats dans les composites cimentaires, à des teneurs ne dépassant pas les 10% (cas de cette recherche) réduit moins l'ouvrabilité, même si d'autre chercheurs ont prouvé qu'elle l'améliore. La solution pour avoir moins d'instabilité dans ce paramètre, et afin d'avoir, un béton léger caoutchouté, coulé et vibré en utilisant un équipement et des procédures adopté pour les bétons légers classiques. L'emploi des granulats de caoutchouc traités, en plus d'une faible dose de super plastifiant, selon la destination prévue pour le mélange étudié.

3.7.1.2 Ségrégation et ressuage des bétons légers

Le paramètre de ressuage B, relatif au béton léger de référence, a été inférieur à 1 ce qui signifie une bonne résistance au ressuage. En ce qui concerne les bétons légers incorporant les granulats de caoutchouc, ce paramètre (B), a été supérieur ou égal à 1 (Figure 3.10). La plus grande valeur, a été observée pour BCm7,5 et BCm10, cela peut être dû à leurs teneurs en granulats de caoutchouc. La faible absorption d'eau du caoutchouc, a pu être une autre cause de ces résultats, selon Ab-Malek et al., le caoutchouc naturel

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

n'absorbe que moins de 5% en eau de sa masse à l'état durci [Mal86].

Les valeurs des paramètres de ségrégation V , ont été évalués en utilisant les équations (3.3) et (3.4), il est nécessaire de noter que, dans le cas des échantillons caoutchoutés, les granulats de caoutchouc se sont concentrés dans le niveau supérieur de l'éprouvette, donc m_2 tend vers zéro pour les 21/35 échantillons étudiés. Un degré de ségrégation V , plus grand que 1,1, indique une faible résistance des granulats à la ségrégation, lorsque ce paramètre est inférieur à 1,1, ceci peut être considéré comme négligeable, et une bonne résistance à la ségrégation est déduite [Ver05].

Pour le béton de référence, le paramètre de ségrégation V , a été inférieure à 1,1 ce qui signifie une bonne résistance à la ségrégation. En ce qui concerne les bétons légers incorporant du caoutchouc, la valeur de V a été de l'ordre de 1,1 à 1,5 lorsque V' varié de 1,15 à 1.3 (figure 3.10).

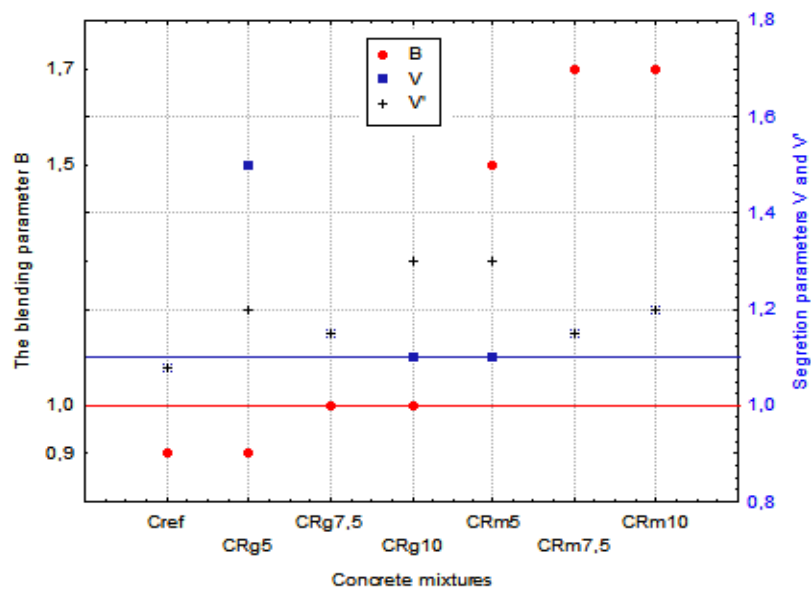


Figure 3.10 Paramètres de ressuage et de ségrégation des bétons légers testés [Med16].

Les bétons ayant une bonne résistance à la ségrégation, ont une contrainte d'écoulement allant de 300 Pa à 2000 Pa, et une viscosité allant de 3 Pa·s à 43 Pa·s [Spa12]. Dans le cas de cette étude, le béton léger de référence, a une valeur de contrainte d'écoulement, selon l'équation (3.6) de l'ordre de 2175 Pa, tandis qu'elle a été seulement d'environ 1905 Pa, selon l'équation (3.7). Il a été impossible d'utiliser l'équation (3.8) puisque les conditions des valeurs des affaissements ne sont pas vérifiées. Les valeurs de la contrainte d'écoulement pour l'ensemble des bétons légers caoutchoutés a été de 2182 à 2333 Pa, en utilisant l'équation (3.6) et 1910 à 2027 Pa, en utilisant l'équation (3.7).

Le ressuage dans le cas des bétons légers caoutchoutés, est important lorsque la teneur en caoutchouc est importante, suite à la faible absorption d'eau de cette matière. Visuellement, la ségrégation des granulats de caoutchouc a été constatée, les valeurs du paramètre de ségrégation V , ont montré une résistance à la ségrégation acceptable. En ce qui concerne l'équation calculant V , elle peut être modifiée par la somme des paramètres de ségrégation des graviers et celle des granulats de caoutchouc.

CHAPITRE 03 : Campagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

Puisque les valeurs présumées de la contrainte d'écoulement et la densité des bétons légers caoutchoutés, ont été affectés par l'augmentation de la teneur en granulats de caoutchouc. Pour quelques applications de bétons légers caoutchoutés, les granulats de caoutchouc doivent être traités.

Ainsi, l'écart entre la forme irrégulière des granulats de caoutchouc augmente la viscosité, ceci, nécessite une augmentation du volume de la pâte pour qu'ils puissent tourner librement et afin d'éviter l'inter-friction entre ces granulats. Koelher et al., ont montré aussi que la forme et la texture des granulats affectent fortement la maniabilité et la rhéologie des bétons [Koe04]. Ils ont confirmé, que la déviation de la forme sphérique entraîne une augmentation de la viscosité. Dans le béton, les particules non sphériques et rugueuses vont demander un volume de pâte plus important pour pouvoir pivoter librement et éviter les frottements inter-granulats. Pour ce phénomène, Turatizine et al., ont proposé d'utiliser des entraîneur d'air (Micro-air 200 dilué) qui contribue à la diminution de la ségrégation et du ressuage, ou bien, un agent de viscosité à base de polymères synthétiques (Rheomac 890 F), pour agir sur la texture de la pâte de ciment, en piégeant les granulats de caoutchouc afin de les maintenir dispersés dans le mélange, permettant ainsi, une meilleure cohésion du mélange en garantissant un équilibre entre la fluidité et la résistance à la ségrégation [Tur07].

3.7.1.3 Teneur des bétons légers en air occlus

L'air occlus est le résultat d'une consolidation incomplète, généralement, il peut atteindre 0,6 à 2,5% dans un béton qui ne contient pas d'agent entraîneur d'air. Il est indésirable (diminue les propriétés mécaniques du béton durci), mais il est parfois inévitable.

Selon la figure 3.11, les teneurs en air des bétons légers, ont augmenté proportionnellement aux taux de substitution. Plusieurs hypothèses, peuvent être avancées comme explications.

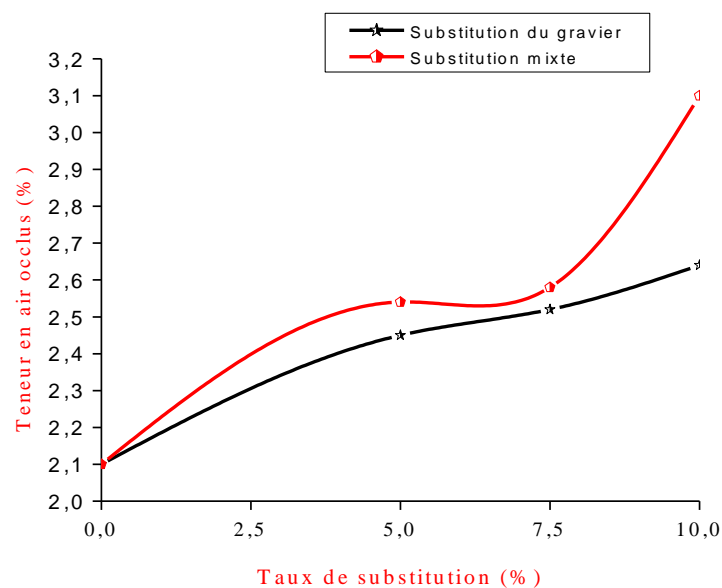


Figure 3.11 Variation de la teneur en air occlus en fonction du taux de substitution [Med16].

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

Dans cette recherche, on a remarqué que la teneur en air des bétons légers testés se situait entre 2,45 et 3,1%, ce paramètre, a augmenté de 16,66%, 20% et 25,71% pour BCg5, BCg7,5 et BCg10, respectivement, tandis qu'elle a augmenté de 20,95%, 22,85% et 47,62% pour BCm5, BCm7,5, BCm10. Cette augmentation, a été tout à fait acceptable et inévitable elle peut atteindre 2 à 5% du volume du composite cimentaire.

Ce qui a été remarqué aussi, est que cette augmentation dépend de la forme, la taille et la quantité des granulats de caoutchouc utilisés. Les bétons légers de la composition (BCm), ont enregistré l'augmentation la plus significative, en particulier BCm10, en raison de leur constitution (tailles $\leq 4\text{mm}$). La fraction granulométrique 0,2 à 1mm est responsable, principalement, de la production de l'air occlus.

Les granulats de caoutchouc ajoutés dans les bétons, ont une aptitude à piéger l'air dans la rugosité de leurs surfaces, ce qui augmente de manière significative le volume d'air dans ces bétons [Fed96; Nai02]. Il est évident aussi que des quantités élevées de l'air peuvent être piégées pendant le malaxage des bétons caoutchoutés [Kar12], elle est aussi justifiée par la nature hydrophobe du granulat de caoutchouc [Tur08; Ben07].

L'air occlus a une influence sur la résistance mécanique du béton, l'accroissement de la teneur en air occlus à l'état frais du béton, se manifeste à l'état durci du même béton en une augmentation de la porosité, en défaveur de la résistance mécanique et, en général, de la durabilité du composite.

Le malaxage peut aussi entraîner une grande quantité de l'air ainsi que le rapport E/C. Ce rapport est maintenu fixe (0,5) dans cette recherche, donc il est impossible de juger son influence sur la présence de cet air. En outre, plus le dosage en ciment est élevé (380 kg/m^3), moins il se produit de l'air occlus (les pores sont petits). Cet effet s'affaiblit, puisque une augmentation de la quantité du ciment réduit le rapport E/C.

3.7.1.4 Masse volumique à l'état frais des bétons légers:

Les masses volumiques des bétons présentées dans la figure ci-dessous, ont été mesurées tout de suite après le malaxage. Dans l'ensemble, les masses volumiques des bétons se situent entre 2271,875 et 2351,56 kg/m^3 .

Les masses volumiques des bétons légers ont été mesurées immédiatement après le malaxage. La valeur la plus basse correspond au BCm10 (Figure 3.15). Globalement, les résultats obtenus expriment une baisse constante de la masse volumique en présence de ces granulats. Il y a eu une diminution progressive de la masse volumique avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans les deux compositions. Cette diminution est de l'ordre de 0,61%, 2,22% et 3,37% en remplacement de 5%, 7,5% et 10% de la composition (BCg) et elle est de l'ordre de 2,71%, 3,23% et 3,97% en remplacement mixte des granulats naturels gros et fins (BCm).

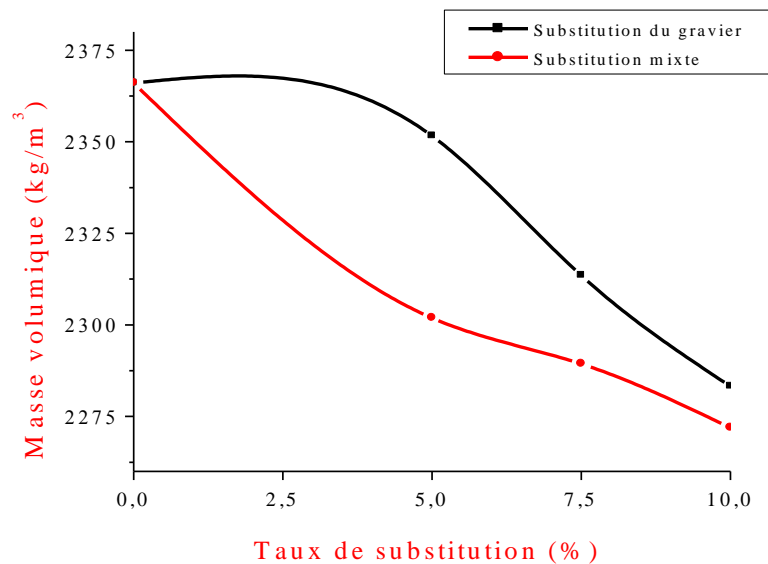


Figure 3.12 Variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du taux de substitution [Med16].

Cette constatation a été signalée dans plusieurs études des composites cimentaires caoutchoutés, où il a été conclu que l'incorporation du caoutchouc granulaire dans ces composites, en particulier à des teneurs en caoutchouc élevées, réduit la masse volumique. Cette réduction, est plus significative pour une teneur en caoutchouc plus élevée [Grd14; Moh14].

La taille des granulats de caoutchouc, a prouvé son effet sur la masse volumique frais des composites cimentaires. Dans le cas de cette étude, la réduction de la masse volumique des bétons légers contenant la poudre de caoutchouc (en plus des granulats grossiers), a été plus importante par rapport à ceux contenant les gros granulats de caoutchouc [Alb05 ; Fad14].

3.7.1.5. Degré de compactibilité des bétons légers

La compactité a été décrite à ce jour, en tant que propriété affectant la qualité du produit fini. Il est difficile de donner des valeurs absolues pour ce paramètre, assurant une installation facile du béton léger frais [Top09]. Les mesures ont signalé une réduction de la compactibilité, par rapport au béton de référence (figure 3.13). Cette réduction, a été de l'ordre de 0,91, 1,82% et 2,4% pour BCg5, BCg7,5 et BCg10, respectivement. Elle a été de l'ordre de 4,89%, 2,98% et 4,39% pour BCm5, BCm7,5 et BCm10, respectivement. Selon la même figure on a constaté que BCm7,5, n'a pas suivi le même scénario de l'évolution de sa compactibilité, ceci, peut être expliqué par un temps de vibration des échantillons de ce béton léger dépassé, par rapport aux échantillons des autres mélanges.

Cet essai, a consisté à faire vibrer les échantillons frais des bétons légers, lors de cette vibration les granulats de caoutchouc, sont remontés en surface. L'introduction d'un agent de texture (agent colloïdal) dans le mélange cimentaire caoutchoutés, a été parmi les solutions proposées pour ce problème [Kli61].

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

Pendant l'exécution de ce test, la même tendance a été remarquée, les granulats de caoutchouc, ont surmonté la surface des conteneurs d'essai. D'après les résultats, tous les mélanges testés, y compris celui de référence, appartiennent à la deuxième classe de compactage (tableau 3.8), ceci, peut être expliqué, par le fait que cet essai ne convient pas à ce type de composites cimentaires caoutchoutés.

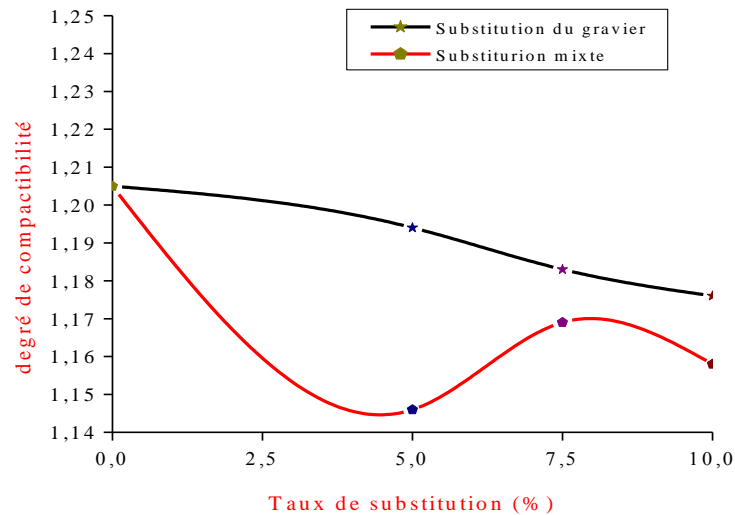


Figure 3.13 Compactibilité des bétons légers [Med16].

Cependant, dans la littérature scientifique on retrouve des résultats d'essais réalisés in-situ mais jamais des résultats d'essais réalisés sur bétons légers [Kal09]. Le concept de compactibilité, est encore peu utilisé aujourd'hui, il est donc difficile de donner des valeurs absolues, garantissant une mise en place facile du béton frais. Pour ce type de problème, Turatizine et al., ont proposé d'utiliser un adjuvant permettant de piéger les granulats en caoutchouc, pour les maintenir dispersés dans le mélange cimentaire, malgré qu'ils ont décrit les granulats de caoutchouc, par fâcheuse tendance à remonter en surface, compte tenu de leur faible densité [Tur07].

3.7.2 Propriétés des bétons légers durcis

Bien que les caractéristiques à l'état frais des bétons légers formulés soient essentielles pour assurer une bonne maniabilité aux mélanges, les critères de qualité des matériaux, sont en général déterminés à l'état durci. Des investigations concernant les résistances mécaniques essentielles, des composites cimentaires caoutchoutés, ont été réalisées. Elles ont conduit à une série d'observations importantes qui ont été confirmées par les résultats existants dans la littérature.

3.7.2.1 Masse volumique des bétons légers durcis:

Les masses volumiques des bétons ayant mûris dont l'âge est de 1,7, 21 et 28 jours, ont été mesuré, sur des éprouvettes cylindriques de Ø16x32 cm, conservées à l'air ambiant jusqu'à l'obtention d'un poids

CHAPITRE 03 : Campagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

constant.

Dans l'ensemble, ces masses volumiques varient de 2080,234 à 2317 kg/m³, l'allure des courbes (figures 3.14 et 3.15) ci-dessus explique la décroissance régulière de la masse volumique avec l'âge de tous les bétons légers du premier jour au 28^{ème} jour. L'utilisation de caoutchouc à granulométrie différente et à de faibles volume ne dépassant pas les 10% en remplacement des granulats naturels, a permis d'avoir de faibles valeurs d'allègement de la masse volumique à l'état durci. Les mélanges obtenus à un taux de substitution de 5 %, produit des matériaux ayant des masses volumiques de l'ordre de 2223,7 kg/m³ et 2225,53 kg/m³ à 28 jours. En effet, ces deux bétons légers caoutchoutés, ont enregistré des masses volumiques proches de celle du béton de référence. La masse volumique observée lors d'une substitution mixte (BCm) à 10% du volume des granulats naturels (sable et graviers), a été plus allégée par rapport aux autres bétons légers caoutchoutés. Ceci signifie que la teneur en caoutchouc, a un effet apparent sur la masse volumique à l'état durci des composites cimentaires caoutchoutés. Plusieurs recherches, réalisées sur des bétons caoutchoutés, ont trouvés les mêmes résultats [Wan13 ; Eir14 ; Moh12].

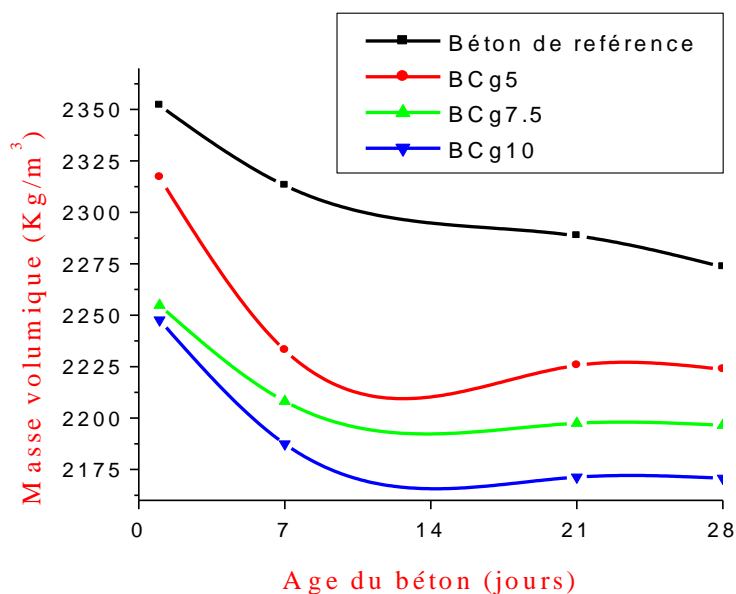


Figure 3.14 Variation de la masse volumique en fonction de l'âge des bétons légers.

L'allègement enregistré dans le cas de la composition incorporant les granulats de caoutchouc fins (BCm), à savoir, le béton léger BCm10, peut être expliqué aussi, par la taille des granulats de caoutchouc fins utilisés. Les réductions de la masse volumique à l'état durci, obtenus dans le cadre de cette recherche (5% à 10% de granulats de caoutchouc), à un rapport E/C fixé à 0,5, auraient été plus importantes si ce rapport était moins important.

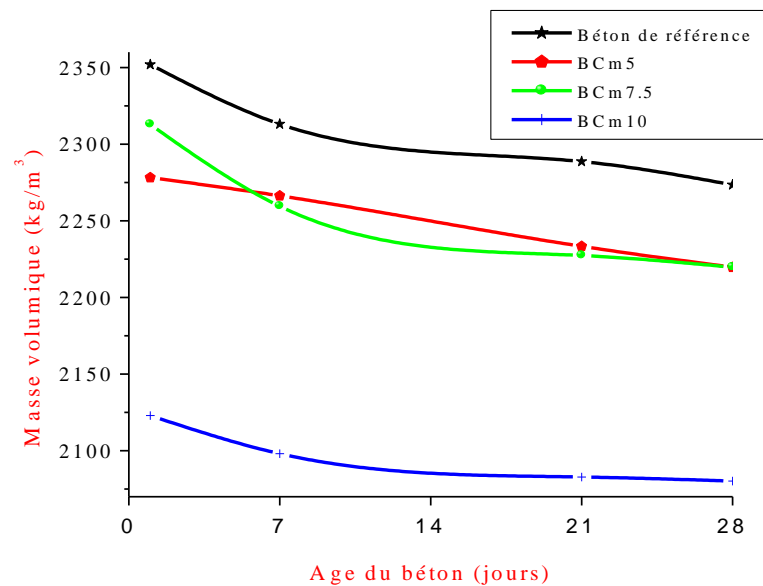


Figure 3.15 Variation de la masse volumique en fonction de l'âge des bétons légers.

3.7.2.2. Résistance à la compression des bétons légers

Pour un béton léger, il n'y a pas de limite inférieure pour la résistance à la compression, puisque dans certaines applications, il n'a qu'un rôle de remplissage ou d'isolation acoustique. L'utilisation des granulats de caoutchouc, en remplacement des granulats naturels grossiers ou fins, a provoqué une perte de la résistance à la compression, comme le montre la figure 3.16.

Comparée à la résistance à la compression du béton de référence, on remarque une diminution de celles-ci pour les deux types compositions de bétons étudiés. Elle décroît de 27,65 MPa, jusqu'à atteindre une résistance minimale de l'ordre de 20,90 MPa, pour le BCg10. La réduction de la résistance à la compression, de la composition (BCg), a été d'environ 2,10%, 14,21% et 24,41% pour BCg5, BCg7,5 et BCg10, respectivement. Pour la composition (BCm), la réduction de la résistance à la compression, a été de l'ordre de 13,74%, 16,45% et 19,67% pour BCm5, BCm7,5 et BCm10, respectivement. Cette diminution de résistance à la compression est liée à la diminution de la compacité des bétons légers en présence des granulats de caoutchouc.

Les essais de mesure de la résistance à la compression des différents bétons légers de cette étude, ont également révélé des modes de rupture identique pour les éprouvettes des bétons légers et celles du béton de référence, dans le cas des deux compositions, la rupture a été produite suivant l'axe longitudinal avec un éclatement à la base des échantillons testés. Les échantillons des bétons légers caoutchoutés ont présenté une ductilité supérieure et moins de fragilité, d'écaillures et de fissures à leurs surfaces par rapport au béton de référence. Les bétons incorporant des granulats de caoutchouc, sont des composites cimentaires de nouvelle génération, ils peuvent supporter des déformations plus importantes avant la localisation de la macrofissuration, ils sont moins sensibles à la fissuration due aux déformations imposées. Ceci, a été expliqué par

CHAPITRE 03 : Campagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

la nature élastique des granulats de caoutchouc [Tur07]. La résistance en compression du béton dépend de la rigidité des granulats utilisés, de la qualité d'interface caoutchouc/matrice cimentaire, la porosité élevée en présence de granulats en caoutchouc [Tur07].

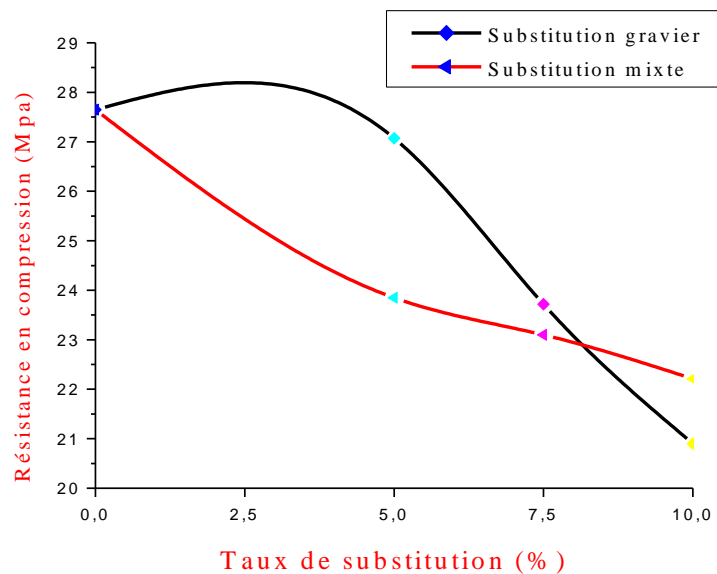


Figure 3.16 Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution.

La plus importante diminution, a été observée lorsque les gros granulats ont été substitué et remplacé par des granulats en caoutchouc, de dimensions plus au moins compatibles. Dans la deuxième composition, la poudrette de caoutchouc, a comblé les vides existants dans la matrice cimentaire, entre les gros granulats. Ceci, a été évident dans le cas du BCm10, contenant 10% de granulats de caoutchouc fins et 10% de gros granulats de caoutchouc, il a présenté une réduction en résistance à la compression, moins importante que celle présenté pour le BCg10, contenant que 10% de gros granulats de caoutchouc.

La présence des gros granulats de caoutchouc dans le béton, réduit la résistance à la compression plus que la poudrette de caoutchouc. [Top97 ; Kha99 ; Eld93]. D'après l'allure des courbes illustrées dans la figure 3.16, il est clair que la teneur en granulats de caoutchouc dans les bétons légers étudiés, a fait son effet sur la nature des résultats. La réduction de la résistance à la compression, est reliée à l'augmentation de la teneur globale du caoutchouc dans ces composites [Ges14; Tho 14; Onu14].

3.7.2.3 Résistance à la traction

Les résultats de mesure de la résistance à la traction par flexion sont présentés sur la figure 3.17 ci-dessous, les courbes présentent les variations de cette résistance en fonction du taux de substitution des granulats. Pour les bétons légers de la première composition (BCg), les résultats ont montré une réduction de la résistance à la traction de l'ordre de 3,27%, 7,47% et 18,69% correspondant aux BCg5, BCg7,5 et BCg10, respectivement. En ce qui concerne les bétons légers de la deuxième composition, les résultats ont montré une baisse en résistance à la traction de l'ordre de 8,8%, 12,61% et 27,10% correspondant aux BCm5,

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

BCm7,5 et BCm10, respectivement. Le béton de référence a donné une résistance à la traction de l'ordre de 2,14MPa. On peut noter, qu'en raison du remplacement des granulats naturels par des granulats de caoutchouc, une diminution de la résistance à la traction, a été produite.

Il a été remarqué que la baisse de la résistance à la traction, est relative à l'augmentation de la teneur en caoutchouc. A 10% dans chacune des compositions étudiées, la diminution de la résistance à la traction est la plus significative. Le béton léger BCm10, a été le composite qui a subi la plus importante chute de résistance à la traction, étant donné qu'il contient la plus grande quantité de granulats de caoutchouc. Onuaguluchi al. et al Gesoglu et al, ont remarqué la même tendance dans leurs résultats, relatifs à l'étude bétons contenant du caoutchouc granulaire [Onu14 ; Ges14].

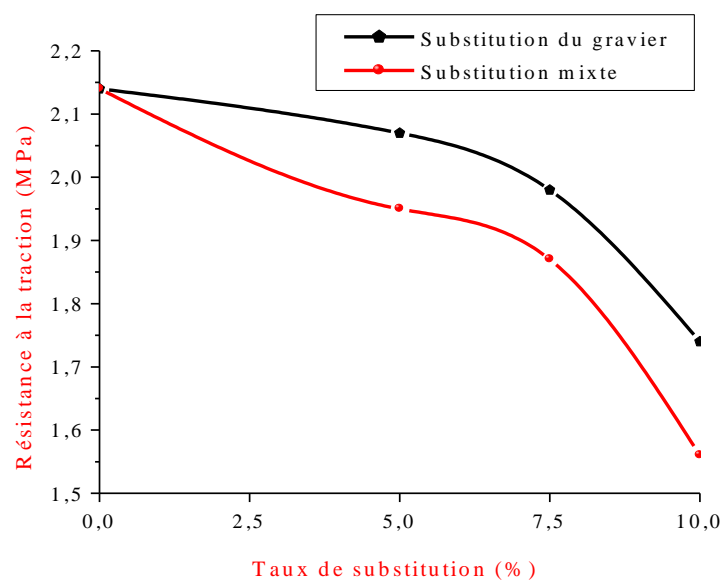


Figure 3.17 Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de substitution.

3.7.2.4 Vitesse d'impulsion ultrasonore dans le béton léger caoutchouté

Les mesures de la vitesse d'impulsion ultrasonore, dans le béton permet d'évaluer sa résistance et sa microstructure, de manière non destructive. Ils sont aussi très utiles, lorsque il s'agit d'un contrôle du béton d'un ouvrage ou dans le suivi de l'évolution d'un béton dans le temps.

L'évaluation de la vitesse d'impulsion ultrasonore, dans les bétons de référence et ceux caoutchoutés testés dans cette recherche, a été faite au 28^{ème} jour. Les résultats sont présentés sur la figure 3.18, dont il a été constaté que, cette vitesse varié entre 2962,96 m/s, 2339,18 m/s et 2531,64 m/s pour BCg5, BCg7,5 et BCg10, respectivement, et entre 2739,72 m/s, 2469,13 m/s et 2325,58 m/s pour BCm5, BCm7,5 et BCm10, respectivement, alors est d'environ 3125 m/s pour le béton léger de référence.

Le béton de référence, a montré une qualité discutable, tandis que, l'ensemble des bétons légers des deux compositions.

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

Dans la moyenne, c'es BCg5 et BCm5, qui ont présenté les vitesses d'impulsion les plus importantes. C'est résultats ont permis de conclure que, les bétons légers incorporant 5% des granulats de caoutchouc, sont des bétons représente une qualité plus ou moins bonne par rapport aux autres. Ainsi, les résultats obtenus dans le cas où 7,5% et 10% ont été substitués par des granulats naturels, ont présenté les vitesses la plus faibles, donc une mauvaise qualité (tableau 3.10). A ces taux de substitution, avec une variété de tailles (gros et petit), les bétons légers contiennent plus de granulats de caoutchouc, donc plus de vides. Ceci, les a rendu plus poreux.

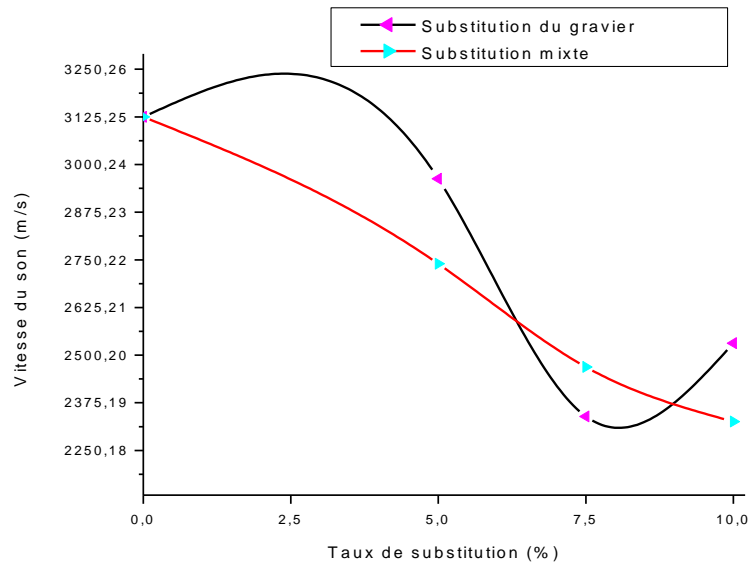


Figure 3.18 Variation de la vitesse de propagation du son à 28 jours.

La diminution de la vitesse d'impulsion ultrasonore, a été proportionnelle à la teneur des bétons légers en caoutchouc, les deux courbes ont la même allure, en raison de la même cinétique de diminution de cette vitesse. Ainsi, cette diminution a été expliquée par l'élongation du temps de passage du son, dans la masse des bétons légers caoutchoutés (figure 3.19), suite à la présence des granulats de caoutchouc.

Les ondes ultrasonores, ont traversé les bétons légers caoutchoutés, où ils ont été brisés ou perturbés par les granulats de caoutchouc et ont parcourus un chemin plus long. L'énergie de ces ondes a été dissipée, suite à la grande porosité dans la matrice cimentaire modifiée par la présence des granulats de caoutchouc. Le temps de leur passage dans les bétons légers caoutchoutés, a augmenté par rapport à celui du béton de référence. Cette augmentation, a été de l'ordre de 7,81%, 33,59% et 23,44% pour BCg5, BCg7,5 et BCg10, respectivement, et d'environ 14,06%, 26,56% et 34,37% pour BCm5, BCm7,5, BCm10, respectivement.

CHAPITRE 03 : Campagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

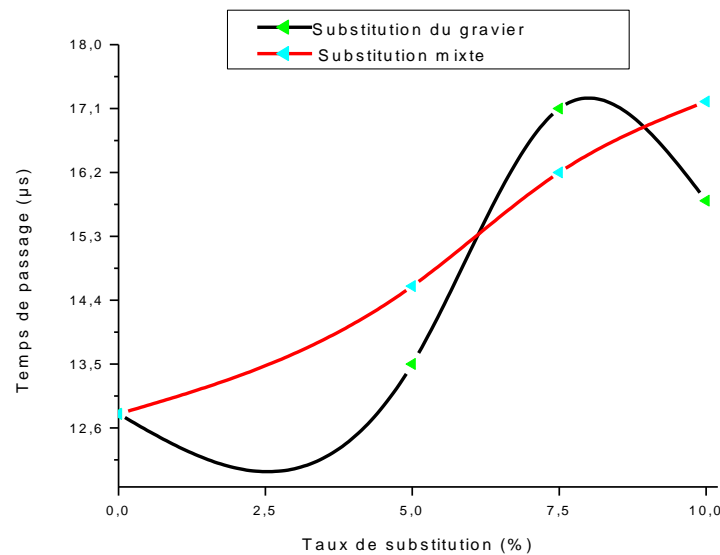


Figure 3.19 Temps de passage des ondes ultrasonores dans les bétons légers âgés de 28 jours.

Zheng et al., ont justifié la réduction en vitesse d'impulsion autrement, ils ont prouvé que les granulats de caoutchouc ayant un module d'élasticité inférieur à celui de la matrice en ciment est responsable de cette réduction [Zhe08].

Lors de cet essai, et en prenant plusieurs mesures de temps d'impulsion, à différents points des deux faces d'une même éprouvette mise à l'essai, il a été remarqué que ces mesures, varient légèrement. L'explication de ceci, est que les bétons légers obtenus, sont peu homogènes. L'auscultation sonique a permis plus ou moins de signaler une légère hétérogénéité dans la structure intérieure des éprouvettes testées, suite aux défauts qui sont des vides ou bien des défauts de compacité des bétons légers. Les variations de vitesses d'impulsion les plus importantes, ont été observées dans les bétons légers caoutchoutés, par rapport au béton léger de référence. La mauvaise distribution des granulats de caoutchouc dans ces mélanges, traduite par la ségrégation des mélanges, a dû affecter ces résultats. Une partie de l'énergie des ondes a pu être absorbée par les particules de caoutchouc caractérisé par leur plus grande élasticité [Far16].

Les résultats du module d'élasticité, ont suivi le même scénario d'évolution au cours de cet essai. La figure 3.20, montre l'effet de différents niveaux de remplacement en caoutchouc sur les valeurs du module d'élasticité. La baisse de la valeur de ce module, a été produite suite à la présence des granulats de caoutchouc.

La diminution de ce module a été de l'ordre de 12,13%, 45,87% et 37,37%, pour BCg5, BCg7,5 et BCg10, respectivement, tandis que BCm5, BCm7,5 et BCm10 ont enregistré une diminution de l'ordre de 23,81%, 39,05% et 49,34%, respectivement. Cette diminution est due au faible module d'élasticité des granulats de caoutchouc par rapport à celui des granulats naturels [Pel11]. La déformabilité des bétons légers a donc changé. Le même résultat a été confirmé par d'autres chercheurs, tels que Goulias et al., Güneyisi et al., Khaloo et al., Zheng et al., Ganjian et al. et Pierce et al. [Gou97; Gün04; Kha08; Zhe; Gan 09; Pie04].

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

En outre, l'ajout de caoutchouc permettra également d'augmenter la ténacité des matériaux [Tah08]. En effet, Cette amélioration en déformabilité, a augmenté, par conséquent leur ténacité, ce qui augmente aussi leur résistance à la fissuration et sa propagation. Ainsi, il a été observé une réduction de la largeur des fissures et de leur propagation dans le béton caoutchouté en comparaison avec le béton de contrôle selon Son et al. [Son11], cités dans Farhan et al. [Far16].

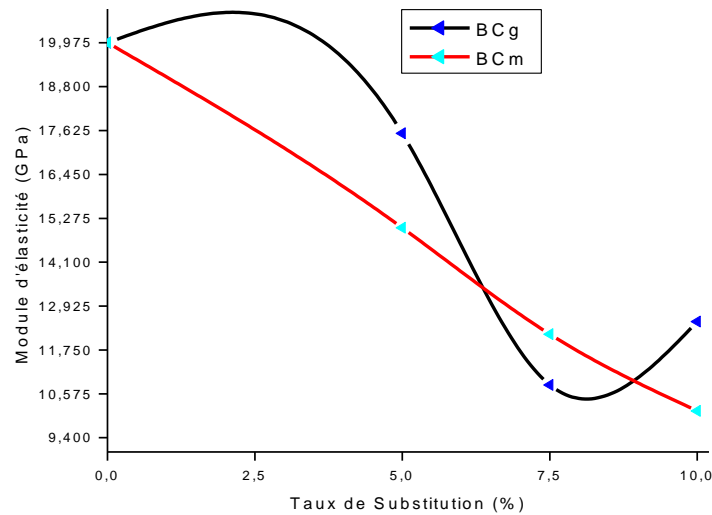


Figure 3.20 Evolution du module d'élasticité des bétons légers à 28 jours.

La microstructure hétérogène du béton, est étudiée essentiellement, afin de prédire leurs comportements sous différentes sollicitations. Le changement total ou partiel de l'un ou de plusieurs de ces constituants, produit des changements, nécessitant d'autres études pour contrôler leurs nouveaux comportements et propriétés, sous l'effet des mêmes sollicitations. L'incorporation de caoutchouc dans la composition a permis de produire des bétons légers caoutchoutés, ayant des masses volumique réduite par rapport au béton de référence, ceci, a réduit notablement la vitesse d'impulsion ultrasonores ainsi que le module d'élasticité qui a été affectés par l'augmentation de la teneur en caoutchouc et la diminution de la masse volumique du béton caoutchouté avec l'augmentation de la teneur en granulats de caoutchouc. Par conséquent, les propriétés de leurs matrices, ont été affectées par ceux du caoutchouc; la cause majeur de ces résultats du fait de leurs nature.

3.8. Conclusion

La compagne expérimentale décrite dans ce chapitre a permis de caractériser les différents granulats utilisés dans la confection des bétons légers, incorporant des granulats de caoutchouc. Elle a permis aussi, de contribuer aux réponses des différentes questions soulevées, quant au rôle des granulats en caoutchouc dans un composite cimentaire, en particulier, un béton léger.

Dans la première partie de ce chapitre, il a été constaté que les granulats de caoutchouc, ont des

CHAPITRE 03 : Compagne expérimentale : Bétons légers caoutchoutés

propriétés acceptables permettant leurs utilisations dans des ouvrages courants. Dans la deuxième partie du même chapitre, l'étude des bétons légers à l'état frais et durcis, a permis de démontrer que la granulométrie des granulats de caoutchouc, leurs tailles ainsi, que leur formes affectent fortement leurs propriétés. La teneur élevée en granulats de caoutchouc, dans ces bétons légers, a modifié leurs maniabilités en réduisant l'ouvrabilité, les a allégé en réduisant leurs masses volumique, a introduit plus d'air dans leurs structures, a réduit leurs résistances à la traction et à la compression, a amélioré leur propriétés acoustique ainsi que leurs élasticité et déformabilité. Il est a signalé, qu'il a été démontré dans cette partie d'étude que la méthodologie utilisée dans l'essai de mesure de compactibilité des bétons légers caoutchoutés, ne correspondait pas à ces composites particuliers. Le paramètre de ressuage et de ségrégation ont augmenté, lorsque la teneur en caoutchouc était importante. Ceci, a été justifié par la faible absorption d'eau des granulats de caoutchouc. Sur la base des résultats, il a été démontré, que la distribution du caoutchouc dans les bétons légers, n'indiquait pas une non-uniformité significative. La ségrégation des granulats de caoutchouc a été visible, les valeurs V de la ségrégation, ont montré une résistance acceptable. En effet, l'équation équation 3.4 doit être substituée par l'équation 3.5 qui semble être plus appropriée dans le cas de béton incorporant des granulats de caoutchouc.

CHAPITRE 04

Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers

4.1 Introduction

Dans le langage courant, la durabilité est de maintenir, soutenir et garder un processus de qualité dans le futur et de garantir sa longévité ainsi qu'assurer l'équilibre des trois composants de ce facteur: environnement, économie et société. La durabilité d'un béton n'est pas une caractéristique, mais plutôt sa réponse aux charges en service et aux conditions environnementales, elle dépend d'une multitude de paramètres, ainsi que de l'agressivité de son environnement. Un élément en béton subissant des cycles d'agression peut se fissurer et se fragiliser, et par conséquent, perdre ses performances.

En réalité la durabilité, est directement liée à l'environnement et au futur des ouvrages et aujourd'hui devenue un paramètre important à considérer pour optimiser les résistances des bétons aux conditions externes : intempéries, agressivité des sols, atmosphères chimiquement agressives..., etc. Elle caractérise la capacité qu'a un ouvrage à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible. Toute fois, elle dépend de nombreux paramètres, de sa conception, de la qualité des matériaux et des produits utilisés, de la qualité des dispositions constructives, de la mise en œuvre des produits lors de la réalisation de l'ouvrage ainsi que de diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

Plusieurs recherches, se sont consacrées à l'étude des méthodes d'évaluation des performances des bétons, afin de prévoir avec précision les durées de vie des ouvrages. Certains de ces travaux, ont permis de définir une démarche basée sur l'utilisation d'indicateurs de durabilité. Parallèlement, de nombreux modes opératoires ont été mis au point, ils permettent de caractériser le comportement du béton vis-à-vis aux agressions chimiques tels que les attaques par acides et les changements climatiques tel que le gel et dégel ou une forte montée en température.

La grande variété des granulats légers (naturels et recyclés) et les nombreuses possibilités de formulation font donc de chaque béton léger un béton avec des propriétés spécifiques. Les bétons légers incorporant deux types de granulats de caoutchouc à différentes proportions (5, 7,5 et 10%). L'objectif de ce chapitre, est donc la compréhension globale des mécanismes de dégradation. L'étude s'est limitée à évaluer la durabilité au gel-dégel, aux attaques acides (des sulfates de sodium Na_2SO_4 et chlorhydrique), aux cycles de mouillage-séchage, à la haute température en passant par l'évaluation de l'émission acoustique.

4.2 Présentation des spécimens de l'étude

La présente campagne expérimentale étudie la durabilité des composites cimentaires présentées dans le chapitre 03. Les éprouvettes testées sont âgées de 05 années.

4.3 Résistance au gel-dégel

La tenue des bétons est l'une des principales préoccupations des constructeurs. La résistance au gel-dégel des bétons de nouvelle génération est considérée comme un indicateur de durabilité des composites cimentaires dans les régions froides. Plusieurs opinions ont été prononcées en ce qui concerne la résistance au gel-dégel. Les chercheurs ayant étudiés l'exposition des composites cimentaire à ce phénomène, ont tous relié ce paramètre, en

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

particulier, à l'air entraîné. Quand la température baisse au voisinage de quelques degrés au dessous du 0°C, une partie de l'eau non combiné contenue dans le matériau se cristallise dans les plus gros pores et capillaires (l'eau dans les capillaires les plus fins restent à l'état liquide) et se transforme en glace en occupant un volume plus important, ce qui génère des contraintes induisant des fissurations internes dans la masse du béton. L'accroissement des pressions hydrauliques dans les capillaires, engendré par ces mouvements de l'eau interne non gelée vers les « fronts de congélation », ainsi que les pressions osmotiques créées par les différences de concentrations en sels dissous entre l'eau située à proximité de l'eau gelée et celle non gelée (présente dans les capillaires fins), sont considérés aujourd'hui comme causes principales des dégradations des bétons dans de telles conditions climatiques. Ces pressions (hydrauliques et osmotiques), peuvent fissurer localement la pâte de ciment, si elles sont supérieures à la résistance à la traction de la pâte. Ce sont les modifications répétées et alternées de température (température positive à température négative) qui après un certain nombre de cycles peuvent dégrader le béton [HO10].

Les dégradations sont le résultat d'un endommagement progressif. Elles dépendent de la vitesse de descente en température, du nombre de cycles et de la durée du gel. En effet, la thermodynamique montre que si cette baisse de température était suffisamment lente, la glace devrait se former à l'extérieur de l'échantillon, entraînant une contraction du matériau lié au départ de l'eau. La redistribution de l'eau des pores avec l'arrivée du front de gel provoquant la détérioration du matériau. Les dégradations dues au gel interne, ne se produisent pas lorsqu'il existe dans le béton un réseau de petites bulles d'air; dense et homogène, permettant le déplacement de l'eau ou lorsque la quantité d'eau gelable, est suffisamment faible et favorisant significativement la résistance du béton aux conditions hivernales (c'est le cas de certains composites cimentaires qui ont une compacité très élevée). Pour empêcher l'apparition de pressions excessives dans le béton, il est possible de créer grâce à un agent entraîneur d'air, un réseau de bulles, elles doivent être nombreuses, de petites dimensions, bien réparties et suffisamment rapprochées. Toutefois, le recours à entraîner une quantité d'air dans un béton n'est pas suffisant pour garantir sa résistance au gel, il faut créer un véritable réseau de bulles d'air. Leurs dimensions ne doivent pas dépasser quelques dizaines de microns. Le volume d'air entraîné et le facteur d'espacement sont les paramètres les plus importants. Cet espacement, qui détermine le niveau de pression, proportionnel au trajet parcouru par l'eau pour atteindre le front de gel le plus proche, doit être inférieur à une valeur seuil de l'ordre de quelques centaines de microns. Ce réseau de bulles permet les mouvements de l'eau et la formation de glace, sans préjudice pour le matériau.

L'utilisation d'un agent entraîneur d'air permet de stabiliser les bulles qui ont été créées au moment du malaxage, sous forme d'un réseau homogène et dense de petites bulles d'air, ce réseau doit être caractérisé par deux paramètres :

- le volume d'air total exprimé en pourcentage du volume du béton (la mesure de ce paramètre est effectuée sur béton frais au moyen d'un aéromètre) ;
- le facteur d'espacement des bulles d'air correspond approximativement à la demi-distance moyenne séparant les parois de deux bulles voisines, d'un réseau supposé régulier. Ce facteur représente la distance moyenne que doit parcourir l'eau pour atteindre une bulle d'air. Il conditionne la tenue au gel des bétons formulés avec un agent entraîneur d'air, sa valeur doit être inférieure à des valeurs seuils, selon la définition de la durabilité des ouvrages en béton. Un réseau de bulles d'air fines avec un espacement de 200 µm pour une proportion de 5 à 8% d'air entraîné du volume totale du béton pour améliorer la résistance de la matrice cimentaire au gel-dégel, est préférable [Pig95 ; Pow49]. Cependant le volume d'air introduit, réduit la résistance mécanique du matériau et les agents entraîneurs

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

d'air, posent souvent des problèmes de compatibilité avec les adjuvants [Moh09]. Aussi, il a été prouvé que 1% supplémentaire d'air entraîné diminue la résistance à la compression de 5 à 6%.

D'après A.M. Neville, pour améliorer la résistance du béton au gel-dégel, en plus de l'entraînement d'air, il est important d'avoir un faible rapport E/C, ce qui permet de réduire le volume de pores capillaires [Nev00]. D'après cet auteur, les pores remarquables sont généralement ceux dues au mauvais serrage ou à un compactage incomplet et ils n'influent pas le gonflement du béton. Plusieurs paramètres jouent sur le phénomène de gel et par conséquent la durabilité. Il a été démontré que la température à laquelle l'eau gèle dans un pore est liée directement à la taille des pores, expérience illustrée sur la figure (4.1).

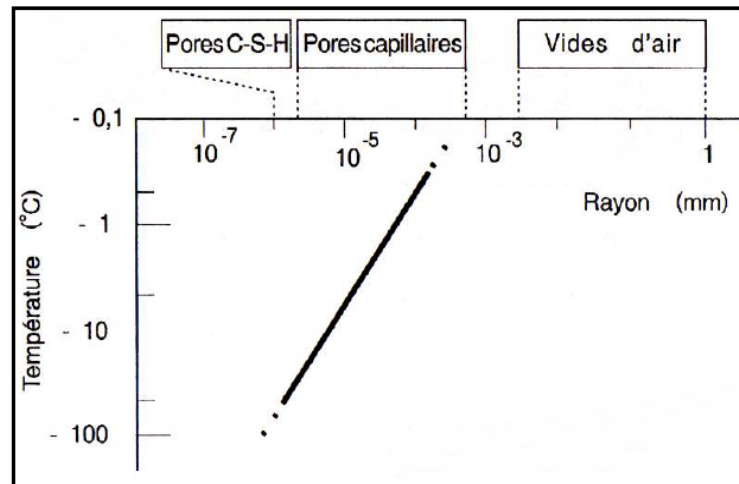


Figure 4.1 Abaissement de la température de fusion de la glace (eau pure) avec la diminution du rayon des pores [Car92]

Les vides présents dans le matériau, remplis de phase gazeuse contribuent au non gélivité observée au niveau des bétons, ils agissent comme des réservoirs tampons permettant à la glace de croître sans exercer de pression sur la pâte à condition que la vitesse de congélation soit suffisamment faible. La résistance de la pâte de ciment sera donc bonne si le degré de saturation critique est inférieur à 0.9 (rapport de la quantité d'eau liquide au volume de la porosité) [Mas67], cité par Carles et al. [Car92]. Ainsi, il ressort de plusieurs études et expériences qu'un béton durable, ayant une résistance mécanique élevée (spécialement en traction) est toujours un béton peu perméable pouvant ne pas se faire saturer des sels fondants. La protection à la pénétration des sels et une teneur en eau gelable réduite par augmentation de la compacité apportent un gain de qualité au matériau.

4.3.1 Effets du cycle de gel-dégel sur la matrice cimentaire

L'effet des cycles gel-dégel sur l'endommagement de la matrice cimentaire a été expliqué par le biais de plusieurs théories :

La théorie des pressions hydraulique (Powers) [Pow49], expliquant que lors de la transformation de l'eau en gel et en exerçant une pression hydraulique; la glace produite chasse l'eau des pores capillaires vers le vide le plus proche susceptible de l'accepter.

En appliquant la Loi de Darcy basée sur l'hypothèse que les vides sont sphériques et répartis régulièrement, Powers a déduit que le parcours le plus long (L_{max}) devrait être proportionnel au coefficient de perméabilité (K) de la

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

pâte de ciment, la résistance à la traction (T) de la pâte, la quantité d'eau gelable (U) à 1 C^0 et la vitesse de refroidissement (R) [Pow49] où :

$$L_{\max} = (K.T / U.R). \quad (4.1)$$

La pression hydraulique est trop importante et provoque la fissuration de la pâte de ciment si le chemin à parcourir est supérieur à L_{\max} . Ainsi, la répartition du réseau de bulles d'air est déduite et la résistance au gel-dégel est obtenue lorsque la perméabilité est faible, induisant une quantité d'eau gelable U , ces deux paramètres agissant en sens inverse et L_{\max} devient insuffisante.

Cette théorie suppose le déplacement de l'eau lors du gel alors qu'il passe des pores des silicates de calcium hydratés (C-S-H) vers les pores capillaires [Car49 ; Gir96]. La théorie des pressions osmotiques, expliquant le phénomène de gel en présence des sels de deverglaçage établi par Powers et al. [Pow53], se base sur le fait que l'eau dans la pâte de ciment gèle à des températures plus basses quand les pores sont petits, en se séparant en deux phases; eau pure et une solution aqueuse plus concentrée. L'eau non gelé dans les petits pores migre par osmose pour rétablir l'équilibre de concentration en créant des pressions osmotiques. Toutefois, plusieurs auteurs ont utilisé les concepts de la thermodynamique classique, expliquant les premières causes des mouvements de l'eau et la dessiccation produite par le gel et le comportement du béton face à ce dernier. Selon ces auteurs l'eau contenue dans les pores de CSH acquiert une énergie potentielle supérieure à celle de la glace lorsque la température baisse. Un tel déséquilibre pousse l'eau non gelé vers les cristaux déjà formés dans les plus gros pores en créant de fortes tensions proportionnelles à un trajet long et une vitesse de refroidissement élevée.

Le phénomène gel-dégel, est tellement complexe que réellement il n'y a pas de théorie pouvant exposer le comportement observé in situ, ceci est en grande relation avec la complexité structurale de la pâte de ciment suite à l'évolution de la taille des pores et la nature du fluide remplissant ces derniers [Ago06].

4.3.2 Mesure de la résistance au gel-dégel

Il ya plusieurs manière pour évaluer la dégradation des bétons soumis à l'effet des cycles de gel-dégel. Leur écaillage suite à l'action des sels fondants est évalué de façon visuelle, par des mesures de pertes des masse du matériau, le changement des dimensions des spécimens testés ou en suivant l'évolution du module élastique dynamique tout au long du processus de dégradation, ou même par mesure de la variation des vitesses de propagation d'ondes ultrason dans les spécimens en fonction du nombre de cycles de gel- dégel. Plusieurs chercheurs ont renoncé à l'exploitation de ces méthodes, à savoir Petrov [Pet03], en optant pour d'autres indicateurs (déformation, résistance à la compression, module d'élasticité statique), lesquels étaient plus significatifs et représentant réellement la dégradation du matériau, sous prétexte que ces mesures ne sont pas toujours exacte.

4.3.3 Essai gel-dégel

Le principe de l'essai permettant d'évaluer la résistance d'un composite cimentaire soumis à une variation de la température agissant sur ces constituants est de placer les éprouvettes dans un milieu similaire, et de produire plusieurs cycles de gel-dégel sur une période de vingt-quatre heures (24 h). Il peut être réalisé suivant l'une des deux procédures décrites dans la norme ASTM C666/ C666M, testant les bétons à de rapides cycles de gel-dégel. La

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

première est dite (A) consistant à effectuer le gel et le dégel dans l'eau et la deuxième dite (B) exigeant que le gel s'effectue dans l'air et le dégel dans l'eau.

Cet essai peut être réalisé en présence des sels fondants, ces derniers produits des dégradations superficielles au niveau des bétons, se manifestant sous forme de désordres les plus fréquents et les plus importants, il s'agit de l'éclatement ou l'écaillage [Car92]. La présence des chlorures de sodium peut augmenter le potentiel des détériorations provoquées par les cycles de gel-dégel, donc afin d'éviter toute sortes de complexité, l'essai de l'évaluation de la durabilité des bétons légers caoutchoutés de ce travail de recherche au gel-dégel est réalisé sans la présence des sels fondants. Cependant, puisque les composites cimentaires étudiées sont des bétons légers à granulats légers et vue que le type des granulats constituant le béton influe fortement sur ses performances, il y a lieu d'étudier les bétons légers de cette étude selon la norme ASTM C330-04, spécifiées pour tester ce type de composites face aux cycles de gel-dégel. Cette norme ne modifie que la cure des corps d'épreuve avant le début de l'essai.

L'étude des différents bétons légers soumis aux agressions de gel-dégel a été entreprise en 1961 par Klieger et al. (Des bétons à faible et haute résistance en compression, avec des granulats secs ou humides, avec ou sans air entrainé), ils ont été étudiés conformément aux normes ASTM C666 (Procédure A) et ASTM C672 [Kli61]. Les bétons légers contenant de l'air entrainé et constitués de granulats même avec une forte teneur en eau, ont témoigné d'une très bonne durabilité. Certains bétons légers sans air entrainé ont également montré des bonnes résistances. Whiting et al., ont étudié la durabilité face à la fissuration interne, de plusieurs mélanges de bétons légers, avec de l'air entrainé. Une grande proportion de ces bétons a présenté de bons résultats [Whi91]. Selon Whiting les bétons suffisamment âgés, lorsqu'ils sont secs, résistent naturellement aux cycles de gel-dégel sans précautions particulières [Whi87]. Les risques de dégradation par le gel n'existent que lorsque le béton est au contact de l'eau, dans un état saturé ou voisin de la saturation [Car92].

Toute fois, la cure doit être appropriée, en 1995, Jacobsen a étudié la durabilité d'un béton en fonction du degré de saturation des granulats légers. Les bétons confectionnés avec des granulats légers ayant une teneur en eau de 30 % (de leurs masses), n'ont pas résistés aux 35 cycles de l'essai, alors que les bétons fabriqués par des granulats légers ayant une teneur en eau de l'ordre de 7 % (de leurs masses), ont satisfait aux exigences [Jac95]. En 2004, Holm a démontré par les résultats d'une étude réalisée sur des bétons contenant des granulats légers ayant une teneur en eau de 24 %, la nécessité d'une période de séchage avant le début de l'essai de gel-dégel pour obtenir des résultats satisfaisants [Hol04]. D'une manière générale, la sensibilité au gel d'une pâte de ciment est étroitement liée à la quantité d'eau gelable. De nombreuses observations in situ faites par une multitude d'opérateurs tendent à montrer qu'un béton n'est dégradé par le gel que s'il est entièrement saturé d'eau ou dans un état voisin de la saturation. Cette période de séchage apparait d'autant plus primordiale que la teneur en eau des granulats légers est élevée au moment du gâchage. Donc, le choix de la cure est entièrement dépendant de l'état de saturation des granulats employés. Dans cette étude les essais de résistance au gel-dégel sont effectués sur des éprouvettes sèches de bétons légers caoutchoutés âgées de 05 années, conservées à des températures et d'humidité de laboratoire. Donc, une période de séchage ne semble pas nécessaire avant l'essai, afin de ne pas influencé l'expérience.

L'essai de gel-dégel dans le cadre de cette recherche est effectué selon la procédure (B), le choix de cette procédure est fait pour assurer une saturation complète des pores, les éprouvettes ont été apporté à la température du gel qui ne peut pas être au-dessous de -19°C à l'air libre pendant douze (12) heures. Le dégel s'effectue dans des conteneurs remplis d'eau propre pendant douze (12) heures aussi, les mesures de poids et longueur ainsi que les

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

inspections visuelles sont effectuées chaque 36 cycles et le changement de l'eau des conteneurs s'effectue après chaque dégel. Dans le cas où les éprouvettes commencent à présenter des détériorations les mesures et les constatations sont effectuées chaque dix (10) cycle. Normalement, la fin de cet essai est annoncée quand les éprouvettes passent les 300 cycles ou lorsque elles atteignent les critères de défaillance. Il est à préciser aussi, que si la valeur du module dynamique relative atteint 60% de sa valeur initiale l'essai peut être considéré comme terminé. Dans la présente étude, l'essai de gel-dégel est poursuivi jusqu'à 100 cycles, qui sont néanmoins suffisants pour déduire des conclusions

L'essai de gel-dégel, consiste à examiner l'apparence visuelle et à noter toute déféctuosité de l'éprouvette, à mesurer l'élongation des éprouvettes sur deux faces opposées ainsi que le taux de perte de masse représentant la différence en poids entre le premier et le dernier état sec du matériau selon la formule (4.2).

La perte de masse est :

$$\Delta m(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (\%) \quad (4.2)$$

m_i : Masse initiale de l'éprouvette avant l'essai gel-dégel

m_f : Masse finale de l'éprouvette après l'essai gel-dégel

4.3.4 Résultats et interprétations

Quand la température descend sous le point de congélation, l'eau dans les pores et les capillaires, se cristallise et tend à occuper un volume plus important. Cette expansion peut générer des pressions internes causant des fissurations qui se développent dans le composite. Toute fois, les matériaux étudiés dans ce travail de recherche (figure 4.2), étant agés de plusieurs années (05 ans), il y a un manque de données servant à interpréter les déformations liées à l'âge et d'autres paramètres responsables des dégradations constatées visuellement.

Les résultats des essais de gel-dégel effectués selon la procédure (B) de la norme ASTM C666, sont représentés sur les figures 4.3 et 4.4, les variations de la perte de masse après 100 cycles sont précisées pour chaque mélange étudié. De manière générale, les mélanges des bétons légers ont passé avec succès le test d'exposition aux cycles rapides de gel-dégel. Afin de mieux suivre les différentes modifications subites par les éprouvettes testées, puisque la période d'essai a été limitée dès le début à 100 cycles, les mesures des changements massiques sont prises et les inspections visuelles sont faites chaque dix (10) cycle.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.



Figure 4.2 Etat des éprouvettes après exposition à 35 cycles de gel-dégel.

Ce qui est constaté pendant cet essai, est que toutes les éprouvettes ont subi une perte de masse, mais à des rythmes différents. Le béton léger de référence, a enregistré les plus grands changements massiques dans chaque cycle correspondant aux mesures effectuées et ceux représentées graphiquement. Il a perdu de sa masse plus rapidement que les autres bétons légers étudiés et la rigidité de ses surfaces a été affectés progressivement. Un gain de masse est remarqué au début de l'essai, variant entre 0,35 et 0,25% pour les 10^{ème} et 20^{ème} cycles respectivement et des pertes de masse entre -0,30 à - 3,10% du 30^{ème} cycle au 100^{ème} cycle. Les éprouvettes BCg5 et BCm5, sont les seules éprouvettes représentant les bétons légers caoutchoutés, ayant connues un gain de masse par rapport à leurs masses initiales lors du 10^{ème} et au

20^{ème} cycle pour BCg5 et seulement le 10^{ème} cycle pour BCm5. Puis le rythme des pertes de masses a changé en fonction de la quantité du caoutchouc contenue dans les éprouvettes et le temps d'exposition au gel-dégel, on a remarqué que la perte de masse augmente avec l'élévation de la teneur en caoutchouc. Puisque il y a une corrélation entre la perte en résistance et la perte de masse, on peut relier ces résultats à ceux de Topçu et al., qui ont étudié la durabilité de mortiers au gel-dégel, ils ont constaté une augmentation de la résistance au gel-dégel avec l'augmentation de la teneur des mélanges en granulats de caoutchouc et que la perte de masse des mélanges étudiés a été moins par rapport au béton léger de référence [Top07]. On peut donc conclure que les mélanges incorporant des granulats de caoutchouc, sont moins gélif et supporte bien les conditions à basse températures.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

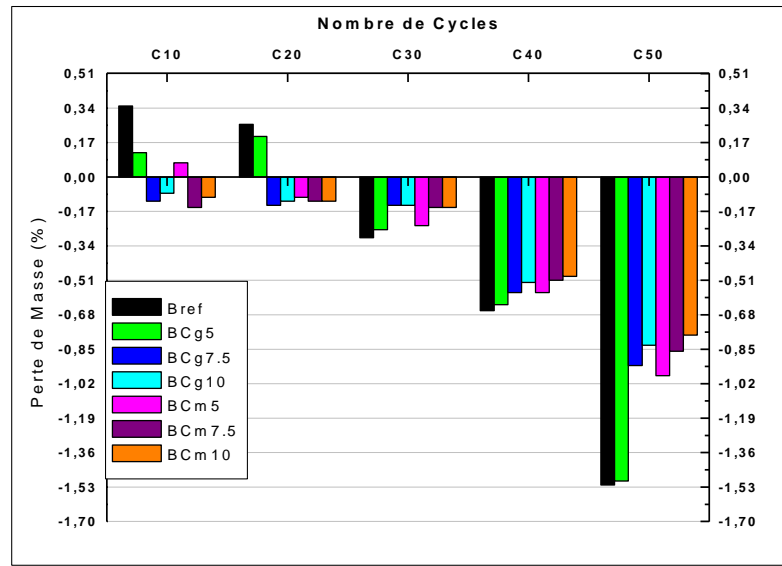


Figure 4.3 Pertes de masse des bétons légers dues au gel-dégel jusqu'au 50^{ème} cycle [Med17].

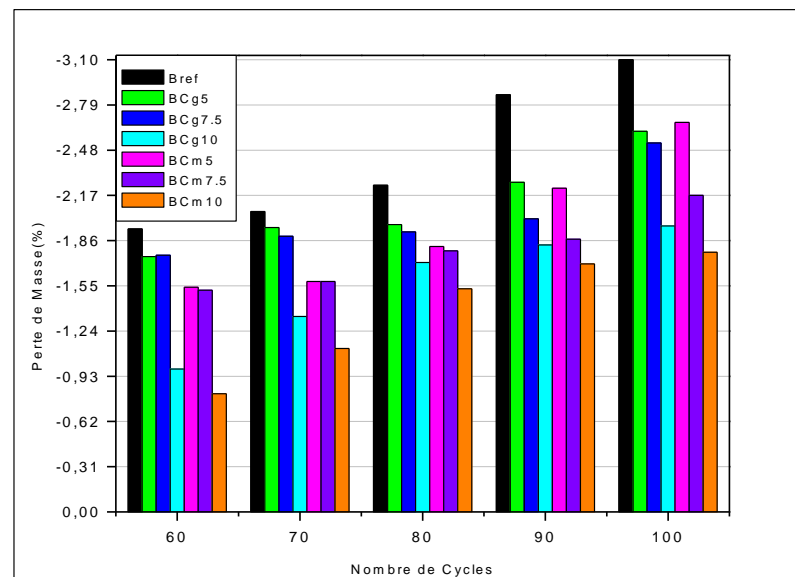


Figure 4.4 Perte de masse des bétons légers due au gel-dégel du 60^{ème} au 100^{ème} cycle [Med17].

Sur le plan visuel et selon Pigeon et al., il y a principalement deux types de dégradations observables dues au gel-dégel dans les bétons: la formation des microfissures et l'écaillage [Pig93]. Dans cet étude, l'éprouvette du béton léger de référence, a présenté des modifications apparentes en surfaces surtout au voisinage des arrêtes, sa texture est devenue rugueuse avec l'apparition de deux formes de pores plus au moins profonds, éparpillés sur les différentes faces des éprouvettes (figure 4.5). La première forme de pores existait avant l'exposition des éprouvettes au gel-dégel, leurs volumes ont augmenté suite à l'expansion produite par cette exposition et l'effet des pressions internes exercés à l'intérieur de ces pores. La deuxième forme de pores est celle des trous laissés suite au décolllement des granulats et des particules du mortier altéré. Il est à signaler aussi, l'apparition de microfissures peu profondes, lesquelles se sont aggravées au 100^{ème} cycle, présentant ainsi les détériorations les plus significatives.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.



Figure 4.5 Etat des éprouvettes après 100 cycles de gel-dégel [Med17]

Les bétons légers caoutchoutés, ont pu résister aux cycles répétitifs jusqu'au 80^{ème} cycle où on a constaté des détachements des granulats de caoutchouc se trouvant à la surface laissant à la place des pores, ce qui peut être expliqué par la perte de ces granulats de leurs enrobage suite à son expansion, cette perte en matière altérée est recueillie dans l'eau du dégel. Les éprouvettes contenant 10% de granulats et de la poudre de caoutchouc (BCm10), sont relativement les moins affectées par cet exposition, après 80 cycles elles sont toujours saines avec une perte de masse de l'ordre de -1,84%, alors que les granulats de caoutchouc se trouvant complètement enrobés et n'ont subi aucune modification.

En effet, l'expansion de la pâte de ciment et les agrégats contenus dans une matrice cimentaire, sont perturbés par l'action du gel-dégel. Les pertes de masses pendant les cycles de gel-dégel augmentent avec le nombre de cycles et est faible pour les basses teneurs en caoutchouc, constatation signalée dans les recherches de [Ben02 ; Ben06]. Par son caractère non expansif, le caoutchouc, est moins rigide et capable d'absorber cette énergie d'expansion empêchant par conséquent la rupture [Lea12]. La présence des granulats de caoutchouc dans les composites cimentaires, limite l'effet préjudiciable du gel-dégel sur ces derniers par le réseau poreux induit. Les bulles d'air entraînées par ces granulats, sont des vides qui agissent comme des chambres d'expansion au cours de la dilatation et la contraction qui allègent la pression hydrostatique dans les bétons lorsqu'ils sont soumis au gel-dégel. Ce comportement traduit par les résultats obtenus dans ce travail de recherche et ceux de plusieurs travaux antérieurs, démontre l'efficacité des granulats de caoutchouc en termes de protection des matrices cimentaires exposées au gel-dégel et favorise l'orientation de ce type de matériau pour les régions froides. Aussi, il faut noter que les pertes de masses enregistrées par les bétons légers caoutchoutés de la composition (BCm), en particulier (BCm10), ont été les moins importantes et il y a une légère différence entre ces résultats et ceux obtenus dans la composition (BCg).

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

Donc le choix entre ces deux compositions reste tributaire à l'usage des bétons légers et aux résistances mécaniques exigées pour cet usage.

Les éprouvettes contenant plus de caoutchouc, en particulier ceux contenant de la poudrette de caoutchouc, ont été comparés avec des échantillons sans air entraîné. Il a été conclu que les fractions de taille plus fine de caoutchouc granulaire incorporé aux mélanges, ont montré de très bonnes performances au gel-dégel [Hir12]. Sur la base de ceci, on peut dire que l'addition la poudrette de caoutchouc peut être favorable pour un béton caoutchouté durable aux conditions de gel-dégel.

Relativement au peu de recherches, qui ont été menée sur ce paramètre, Paine et al., ont suggéré que la résistance au gel-dégel augmente à mesure que la taille des granulats de caoutchouc diminue [Pai10 ; Ric15]. L'air piégé par la forme irrégulière des granulats de caoutchouc améliore la durabilité au gel-dégel des composites cimentaires [Ben01]. La zone interfaciale pate/granat de caoutchouc, est la zone de faiblesse de ces matrices, dans le test au gel-dégel, on se trouve obligé d'inverser les conclusions tirées à ce sujet. En effet cette zone, devient une zone de soulagement et de libération des pressions internes exercés par l'air et la glace. Pelisser et al. dans leur étude, ont prouvé l'existence d'un écart entre l'interface du granulats de caoutchouc et la pate de ciment. La présence de cette zone, signifie la présence de l'air ce qui contribuera à la création d'un système de libération de pression [Pel11]. Ces granulats hydrofuges améliorent considérablement la durabilité du béton exposé à l'humidité pendant les cycles de gel et de dégel et réduit les dommages causés par le gel-dégel [Laz13].

La perte de masse se produit souvent sans accompagnement d'un changement dimensionnel. On suppose que la plupart des dommages se produisent en raison de l'expansion du volume de 9% à cause de la conversion de l'eau en glace. Selon les résultats de cette étude et ceux de la littérature, la teneur, la taille et le nombre de cycles ou la durée d'exposition sont les facteurs déterminant la tenue des bétons légers caoutchoutés. Un teneur de l'ordre de 10% de poudrette de caoutchouc combinée avec des gros granulats de caoutchouc semblent être bénéfique pour les bétons légers dans de telles conditions.

4.4 Les attaques des acides des bétons :

Afin de bien mener l'étude de la durabilité des composites cimentaires contenant des granulats de caoutchouc, lorsqu'ils sont soumis aux agressions des acides on doit tenir compte de la nature de l'acide organique ou inorganique et de ses caractéristiques (figure 4.6). Les milieux agressifs peuvent être assez variés, selon le type d'agression, surtout quant il s'agit d'une attaque par acide, en particulier un acide inorganique (acides forts).

Les résultats obtenus montrent l'importance du degré d'agressivité de la solution dans la mise au point d'un béton résistant et par conséquent durable. La totalité des résultats de la littérature, indique que la nature de l'acide a une influence sur les bétons surtout dans le cas des acides forts. Ainsi les cinétiques de dégradations causées, varie d'une attaque à autre, selon Nilson, la température ambiante et l'humidité relative ont un effet sur l'agressivité de l'attaque [Nil95]. Certains auteurs ont montré que le changement de température n'a pas d'importance sur l'agressivité de l'acide [Gru89 ; Meh85]. Donc, il est important lors de l'étude de la stabilité d'un nouveau composite cimentaire, de mettre en évidence l'influence des conditions auxquelles il est exposé, et ce, afin d'évaluer l'intensité de l'attaque d'acide et de connaître l'intensité des dégradations causées. En termes de changements de phases qui apparaissent dans ces échantillons qui ont été immergés pour une durée de trois (03)

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

mois, dans les solutions contenant l'acide de sulfate de sodium Na_2SO_4 et l'acide chlorhydrique HCl ou autres.

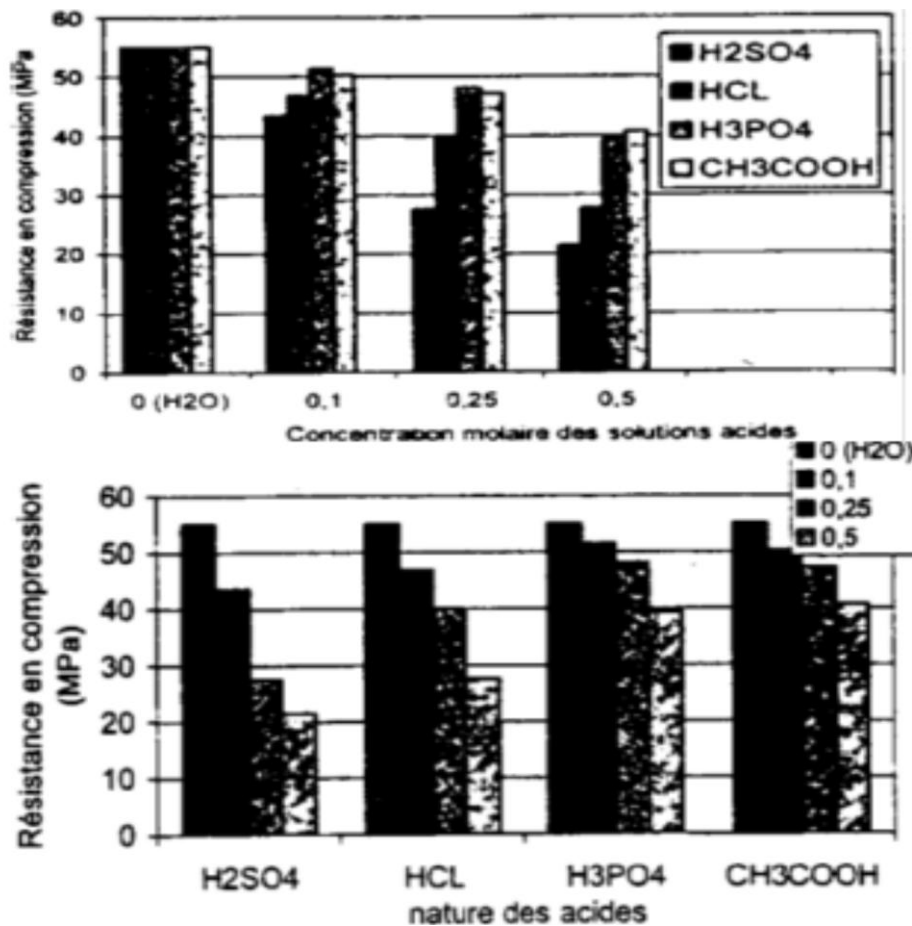


Figure 4.6 Influence de la nature et de la concentration des solutions d'acides sur les résistances mécaniques des mortiers [Ach04]

Les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton à un pH très élevé) rendent le béton un milieu basique réactive vis-à-vis les acides telles que les pluies acides, les eaux chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux et même les eaux pures.

Cette étude se limitera à présenter l'attaque de deux acides de sulfate de sodium (Na_2SO_4) et l'acide chlorhydrique (HCl).

4.4.1 Attaque des bétons par sulfate de sodium (Na_2SO_4)

Jusqu'au ce jour, on ne maîtrise pas l'origine de l'attaque par l'acide de sulfate. Généralement, elle est à l'origine de précipitation de produits sulfatés secondaires, elle peut détériorer le matériau cimentaire, à plus au moins long terme, selon la nature, la teneur et la concentration des sulfates au contact ainsi que le type du ciment utilisé et le rapport Eau/Ciment.

On distingue deux types d'attaque par sulfate, la première est interne associée aux sulfates déjà présents dans le béton, la deuxième est externe et se produit quand le béton se trouve directement en contact avec une source de sulfate.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

D'après plusieurs recherches, telle que celle de Kumar, laquelle a été simplifiée par Planel et al., pour se concentrer sur l'attaque des sulfates, les mécanismes fondamentaux d'altération des bétons par réactions chimiques, ainsi que leurs effets ont été étudiés. Les conclusions qui ont été tirées sont: l'existence de deux réactions, l'hydrolyse des hydrates de la pâte de ciment durci et les réactions entraînant la formation des produits expansifs (associés à l'attaque au Sulfate de Sodium Na_2SO_4). A l'échelle macroscopique il a été observé: la formation d'un hydrate expansif, modification de la porosité, fissuration et déformation du matériau et à la fin, une chute de résistance et de rigidité [Meh83 ; Pla06]. Autrement dit, les conséquences de la pénétration des sulfates dans le béton, sont des désordres qui sont le plus souvent dues à la cristallisation d'espèces sulfatées secondaires comme l'ettringite ou la thaumasite [And00].

Le gonflement entraîné par conséquent, produit une perte de résistance et une altération de la surface d'élément en béton. Si le phénomène de formation du gypse est le plus connu, l'ettringite ou la thaumasite, ne sont pas à négliger dans la pratique. En outre, pour le même processus et le même stade de dégradation, le taux d'atteinte varie en fonction de l'indicateur mesuré [Sah07]. Pour le même béton l'importance relative de ces phénomènes peut varier de façon très sensible en fonction des conditions de l'attaque par sulfate.

L'intensité du mécanisme de l'expansion par sulfate, est influencée directement par: la qualité du béton (la composition du ciment, le mode de fabrication, la cure, l'état d'endommagement du béton avant l'attaque), la concentration en sulfate (quantité et type) par laquelle il est attaquée et enfin les conditions environnementales et atmosphériques, à savoir, les variations du taux d'humidité (cycles d'humidification-séchage), la fréquence des intempéries, la température et la surface exposée [Ho10]. Autres facteurs dont l'influence a été étudiée, la nature du cation associé aux ions sulfate et le pH de la solution d'immersion (contrôlé ou non). Ces paramètres intéressants servent pour mieux comprendre les mécanismes impliqués dans les différents essais. Il est primordial de réaliser un contrôle des propriétés du matériau soumis à une attaque aux sulfates avant que sa détérioration ne soit trop avancée.

De nombreux essais de laboratoire relatifs aux attaques par sulfate externes, ainsi que quelques retours d'expérience, permettent de mettre en évidence l'influence de certains paramètres sur la résistance des bétons aux sulfates. Même si certains résultats, semblent contradictoires, il est possible d'identifier quelques tendances où le risque est élevé.

4.4.1.1 Les essais existants

Il est intéressant de disposer d'un essai représentatif, permettant de qualifier dans des délais raisonnables des formules de béton. Or, les essais normalisés actuels, présentent des inconvénients qui les rendent difficilement utilisables pour ce type d'application. Les essais courants, utilisés pour étudier le phénomène d'attaque des sulfates aux composites cimentaires, afin de déterminer leur résistance à ces agressions, sont très divers. Leur fonction principale, est d'accélérer le vieillissement ou dégrader le béton et quantifier cette dégradation. Le principe de base de ces essais, consiste le plus souvent à immerger des éprouvettes du matériau testé dans une solution acide de sulfates. La forme des éprouvettes varie en fonction des mesures prévues.

Les principales grandeurs à mesurer dans le cadre d'essais de qualification des bétons soumis à ce type d'agression, sont généralement les dimensions de l'éprouvette (les mesures de variations dimensionnelles mettent bien en évidence la formation d'ettringite expansive), sa masse et sa résistance.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

a) Choix du cation

Il faut se rapprocher autant que possible des conditions réelles d'exposition, tel que le choix du cation (sodium, calcium, magnésium), lequel doit être cohérent avec le type d'agression pour permettre un essai représentatif. Il est à noter que, maintenir un pH et une concentration de la solution d'immersion constante durant la période d'essai, n'est pas toujours possible.

b) La température

En ce qui concerne la température, les conditions varient peu selon les types d'essai et ça dépend de ce qu'on souhaite mettre en évidence. La plupart des essais sont réalisés à environ 20°C, alors que l'effet de la température sur l'accélération de l'essai n'a pas été démontré.

c) Dosage en sulfate

La concentration en sulfates des solutions d'immersion utilisée dans les essais de vieillissement, est déterminée selon la solubilité dans l'eau des sulfates en question, ainsi que leurs types et leurs quantités. Ainsi, ces concentrations sont souvent choisies de la littérature.

L'eau de mer, contient en moyenne 2,6 g/l d'ions sulfates, la teneur en sulfates des sols peut varier localement. Certains essais, proposent des valeurs plus de dix fois supérieures à cette valeur. Dans d'autres essais, ils utilisent souvent de fortes concentrations en sulfates (> 10 g/l), c'est-à-dire, supérieure à celles rencontrées dans des environnements naturels [Buc05]. Cette concentration élevée, se traduit en mécanismes de dégradation trop avancés. Il est donc souhaitable d'utiliser des solutions moins concentrées, mais également de mettre en évidence les conditions aux limites; la concentration et le pH.

Certaines normes, préconisent de renouveler fréquemment la solution, afin d'empêcher son pH d'évoluer à nouveau et de passer de neutre à basique, alors que dans des conditions réelles la réserve en cette matière chimique est inépuisable.

d) Durée de l'essai

L'intérêt des recherches réalisées sur les matériaux, est de qualifier ces matériaux dans un temps limité. Dans ce genre d'essais (Attaque d'acide de sulfate), le problème de la durée d'essai se pose. L'utilisation de faibles concentrations, demanderait plus de temps d'investigation, c'est pourquoi le choix est presque toujours porté sur 5% représentant le seuil maximal pour un milieu très agressif. Même avec un pH et une concentration préalablement maintenus constants, la durée de l'essai ne peut être abrégée et ça pourra prendre entre 3 mois à 1 an environ [Bu05].

e) Cure des corps d'épreuve

Une bonne cure, donne à la surface du béton une meilleure compacité et une perméabilité réduite, c'est deux paramètres sont censées offrir aux bétons ayant subi une cure humide, une meilleure résistance aux agressions, en empêchant la pénétration des ions ou des gaz. Cependant, dans le cas des attaques par sulfates externes, plusieurs études ont montré que dans certains cas une cure humide prolongée, pouvait réduire la résistance aux attaques, même si cela n'a pas encore été clairement expliqué, et que cet effet semble s'estomper avec le temps [Hig02]. La formation d'une couche carbonatée, à l'air, pourrait protéger le béton. Par ailleurs, cela pourrait provenir de différences de contenu en hydroxyde de calcium (produit de l'hydratation) qui augmente la sensibilité aux attaques

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

par les sulfates. Dans le cadre de cette étude les éprouvettes, sont protégées de la dessiccation et conservées à l'air à 20 ± 2 °C pendant 05 ans. Suite à cette longue période de conservation une cure humide de sept (07) jours a été effectuée, afin de reproduire les conditions du terrain avant d'être placées dans le bain de solution acide.

4.4.1.2 Mesure de la résistance à l'attaque par les sulfates

Afin d'évaluer la durabilité des bétons légers durcis, exposés aux sulfates de sodium (Na_2SO_4) et mettre en relief l'influence de la présence des granulats de caoutchouc, remplaçant partiellement des granulats naturels des éprouvettes des différentes compositions étudiées dans ce travail, ont été soumises à l'essai.

Les éprouvettes sont sciées, afin de maximiser la surface du contact du béton léger avec la solution acide, ce qui permet d'accélérer l'effet des sulfates en augmentant la surface d'exposition. Six (06) de ces éprouvettes, sont destinées à l'essai de vieillissement dans la solution acide, six (06) autres, sont mises dans un milieu témoin (l'eau du robinet) et les six (06) dernières, sont mises séparément dans la solution acide, elles servent pour mesurer le pH de la solution d'immersion avec un indicateur de pH en papier chaque 30 jours.

La solution du sulfate de sodium (Na_2SO_4), utilisée pour l'expérimentation est préparée 48 heures avant son utilisation à une concentration massique de l'ordre de 5% avec de l'eau distillé (une masse de l'ordre de 7,08 g dans 1l d'eau distillé), elle est stockée à une température de l'ordre de 23 ± 2 °C, selon les exigences de la norme ASTM C 642. Le rapport de volume de l'éprouvette du béton léger et la solution acide est $4 \pm 0,5$.

L'essai nécessite l'immersion totale des éprouvettes testées, leur saturation complète demande un temps d'immersion suffisant de l'ordre de (06) heures, le temps de séchage est de (18) heures, ainsi le cycle de l'essai sera vingt quatre (24) heures. Ce cycle laisse à penser que le taux du mouillage, est plus rapide que la vitesse de séchage.

La deuxième condition de cet essai, est la température de séchage, les éprouvettes peuvent être séchées à 105 °C pour accélérer le vieillissement des composites cimentaires en présence de la solution sulfatée, comme elles peuvent être séchées à 60 °C, le but est le même, le vieillissement est toujours accéléré mais le teste est moins sévère. L'inconvénient du choix de la température 105°C, c'est qu'il y ait un risque d'attaques d'acide de sulfate interne, alors qu'à une température inférieure à 65 °C, aucun cas de formation différée de l'étringite n'a été détecté [Bru07 ; Bru05], ainsi la nature particulière des granulats de caoutchouc, utilisés dans ce travail de recherche nous porte à opter pour le choix de la température de 60°C. Il est à noter que cet essai, est similaire au teste de vieillissement des pierres sous l'effet de la précipitation des sels.

La période prévue pour cet essai, est trois (03) mois d'immersion totale dans une solution dosée à 5% de Na_2SO_4 renouvelable tous les 30 jours avec un procédé de mouillage – séchage. Après chaque retrait des éprouvettes étudiées de la solution, elles sont rincées à l'eau du robinet jusqu'à ce que le mortier altéré soit éliminé, ensuite elles sont égouttées et laissées pendant une demie (½) heure à l'air libre pour sécher. Au cours de la période de l'essai ces échantillons, ont été périodiquement prélevés et pesés puis remis dans la solution. La résistance à l'agression par attaque des sulfates de sodium aux éprouvettes testées, est vérifiée en suivant leurs pertes de masses.

La perte de masse, est un facteur simple et traditionnel dans les testes de mesure d'attaque d'acide, cet indicateur peut dépendre de la taille des éprouvette et du type de ciment [Cha05], ainsi que la sévérité de l'acide, cet indicateur est acceptable pour évaluer la résistance du béton dans les milieux chimiquement agressifs [Mon00]. Elle est calculée par :

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

$$\Delta ms = \frac{M_t - M_i}{M_i} \times 100 (\%) \quad (4.3)$$

M_t : Poids après immersion dans l'acide.

M_i : Poids avant l'immersion dans l'acide.

Les pesées sont effectuées à l'aide d'une balance de précision de l'ordre de 0,01g.

4.4.1.3 Résultats et interprétations

En terme de changement massique, la totalité des éprouvettes testées par l'attaque des sulfates de sodium, ceux contenant de 5%, 7,5% et 10% de caoutchouc et ceux sans caoutchouc (béton léger de référence), ont présenté un gain de masse en raison d'absorption de la solution acide, et ce, jusqu'au 12^{ème} cycle. Généralement, dans le cas de ce genre d'attaque, ce gain est attribué à la formation de gypse et d'ettringite suite à la réaction des sulfates avec l'hydrate d'aluminates de calcium pour former sulfo-aluminates de calcium et l'hydroxyde de calcium libre dans le ciment pour former du sulfate de calcium. Au 18^{ème} cycle, le rythme de l'attaque a commencé à changer pour les éprouvettes BCg7,5 et BCg5, ont subi des pertes de masse assez insignifiante de l'ordre de 0,15 et 0,06% respectivement (figure 4.7).

La formation de gypse peut conduire à l'expansion en plus de la perte de masse qui est généralement observée lorsque le gypse se forme. A ce stade, des effets néfastes tels que l'écaillage, la fissuration, le ramollissement, la perte de résistance et d'autres formes de dommages peuvent provenir [Tia00].

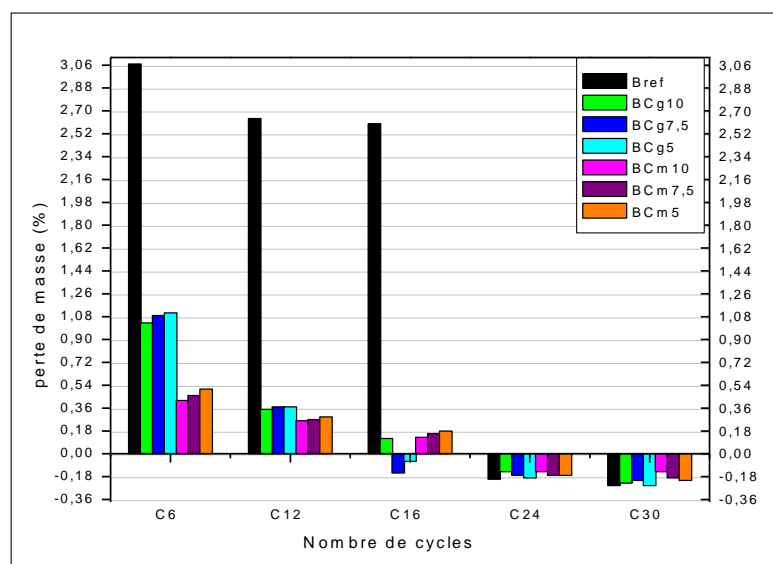


Figure 4.7 Evolution des pertes de masse jusqu'aux 30 cycles dues à l'attaque par Na₂SO₄ [Med17].

La perte de masse a ensuite augmenté légèrement et proportionnellement au nombre de cycle d'exposition des bétons légers. A un mois (30 cycles) d'exposition elle n'a pas dépassé 0,25% pour le béton léger de référence comme étant un maximum enregistré dans ce cycle et 0,23% pour les différents bétons légers caoutchoutés (figure 4.7). L'étude de l'attaque des sulfate au composites cimentaires caoutchoutés, a montré que l'augmentation

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

de la perte de masse est reliée à l'augmentation de la durée d'exposition, les composites incorporant 5% de granulats de caoutchouc ont présenté les meilleures résistances à ce type d'agressions [Yun13].

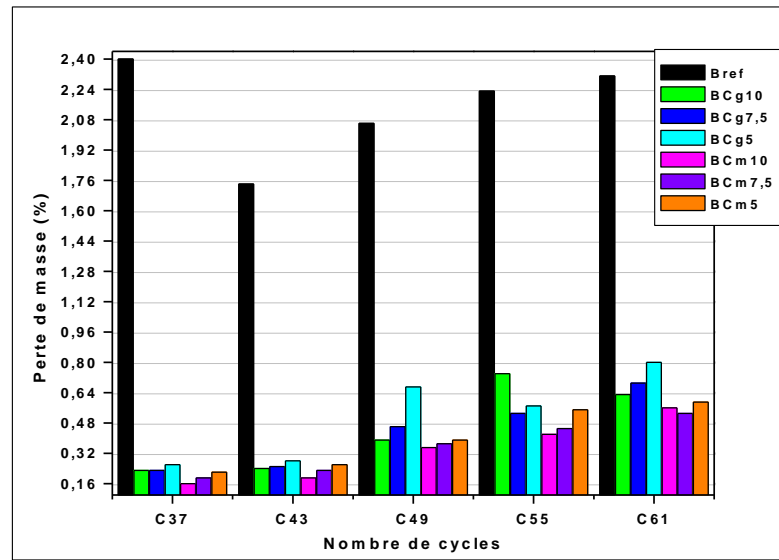


Figure 4.8 Evolution des pertes de masse jusqu'aux 60 cycles dues à l'attaque par Na_2SO_4 [Med17].

Durant cet essai, le béton léger de référence a enregistré les pertes de masse les plus importantes (figure 4.8). Au 37^{ème} cycle, il a perdu 1,4% de sa masse initiale, alors que les bétons légers caoutchouté ont marqué un maximum correspondant au BCg5 de l'ordre de 0,26% et un minimum d'environ 0,16% correspondant au BCm10. C'est au-delà de ce cycle que le rythme suivi par la perte de masse est confirmé.

En examinant la figure 4.9, on remarque que la perte de masse est minimisée par la présence des granulats de caoutchouc, à 90 jours d'immersion elle atteint 2,62% pour le béton léger de référence et ne dépasse pas 1,97% (BCg5) pour l'ensemble des bétons légers caoutchouté. Cependant, ces derniers présentent des pertes de masse presque invariables, ce qui explique que les taux de substitution étudiés dans ce travail de recherche (5, 7,5 et 10%), se rapprochent en termes d'influence sur la résistance à l'attaque par les sulfates de sodium (Na_2SO_4), mais selon les résultats toujours, la composition (BCm), particulièrement BCm10, a présenté les meilleures résistances à l'attaque par Na_2SO_4 .

La détérioration des composites cimentaires, est souvent initialisée par un processus chimique, malgré les facteurs physiques et mécaniques qui peuvent causer des détériorations combinées ou non à un milieu agressif. La résistance au sulfate externe, est directement liée à la densité et la perméabilité du composite cimentaire, un béton dense ayant une perméabilité moindre a une résistance meilleure qu'un béton poreux et perméable.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

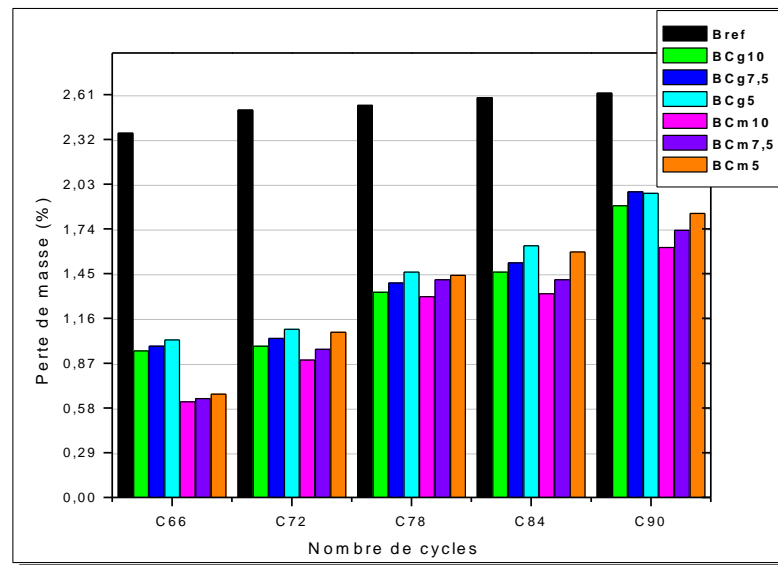


Figure 4.9 Evolution des pertes de masses jusqu'aux 90 cycles dues à l'attaque par Na_2SO_4 [Med17]

Visuellement, les surfaces attaquées sont rugueuses, avec apparition de couche blanche due à l'accumulation des sels à la surface (figure 4.10). L'ajout des granulats de caoutchouc et leurs existence à la surface est efficace pour réduire la perte de masse des mélanges exposés à l'attaque, en raison de minimiser le contact des granulats naturels avec l'acide de sulfate de sodium.

Dans ce travail de recherche, le béton léger de référence, durant les 90 jours d'essai a perdu le plus de sa masse initiale, il a développé des microfissures à ses surfaces, la majorité de ces microfissures ne se connectent pas entre eux. Ces microfissures qui engendrent la réduction de la résistance, sont attribuées aussi à la réaction entre la portlandite (C-H) suite à l'hydratation du ciment avec les sulfates pour former du gypse et de l'ettringite expansive. Ceci, est expliqué par l'accumulation des produits hydratés pendant l'exposition aux sulfates dans les pores et les zones inter-faciale [Coh91 ; Nev11].

Ainsi, durant ces 90 jours, le béton léger caoutchouté BCm10 a subit une perte de masse minimum qui ne dépasse pas 1.62%. Ce qui est constaté, dans le cas des bétons légers caoutchouté, est qu'il n'y avait pas de granulats de caoutchouc dans les bacs à chaque fois où les éprouvettes sont rincées. Les zones attaquées ou agressée par l'acide, sont celles où il n'y a pas de granulats de caoutchouc (figure 4.11), par contre là où ces derniers sont présents, la surface est moins affectée par l'acide. La surface a été raccommodée par la présence des granulats de caoutchouc ce qui a empêché la formation des fissures, cette constatation a été confirmée par Thomas et al. et Blessen et al. [Tho15 ; Ble15].

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.



Figure 4.10 Eprouvettes après 60 cycles d'immersion dans une solution de Na_2SO_4

Selon Benazzouk et al., les granulats de caoutchouc limitent l'absorption d'eau et ceci peut servir à réduire l'impact d'un environnement agressif et améliore aussi la durabilité [Ben02]. Plusieurs chercheurs, ont prouvé que le béton classique est moins résistant aux sulfates [Ram], alors que d'autres ont prouvé que l'incorporation du caoutchouc dans un béton (latex) améliore sa résistance aux sulfates [Moh09]. Ohama et al., ont démontré la relation existante entre l'augmentation de la résistance aux sulfates et la teneur élevée en caoutchouc et que la pénétration du Na_2SO_4 dans le béton est limitée par la présence de cette matière [Oha95]. Les résultats de Jinhua et al., convergent aussi vers les résultats sus-cités et confirment que à 5% et 10% de granulats de caoutchouc fins, la résistance à l'attaque du sulfate du béton est améliorée [Jin15].

En ce qui concerne les variations dimensionnelles, on constate que l'immersion des bétons légers caoutchoutés dans la solution acide de sulfate de sodium (Na_2SO_4), n'entraîne pas de changement dimensionnel significatif, alors que la perte de masse est produite mais pas assez importante.

Hong et al., ont expliqué que les cycles de mouillage-séchage sont impliqués dans la création d'un environnement agressif pour les bétons et les mortiers en raison du mouvement des ions sulfates et des concentrations accrues des pores du béton [Hon]. Les cycles mouillage-séchage sont l'une des principales causes qui accélèrent le vieillissement des corps testés, ces cycles favorisent l'attaque des sulfates en la rendant plus importante. Lors du séchage et quand l'eau s'évapore des bétons légers exposés, la concentration des sulfates augmente en surfaces et la cristallisation des sels de sodium (Na_2SO_4) en raison de mouillage-séchage du béton causant ainsi des dommages tels que l'écaillage des surfaces.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.



Figure 4.11 Etat des éprouvettes après 90 cycles d'immersion dans une solution de 5% d'acide de Na_2SO_4 [Med17]

Les éprouvettes de cet étude, sont soumises aux cycles de mouillage-séchage, afin d'accélérer le processus de détérioration. Après chaque séchage, il a été constaté qu'elles sont couvertes d'une substance dues à l'accumulation des sels sur les surfaces, la dégradation de ces derniers est accélérée par leur présence.

Le degré de détérioration des composites, soumis de façon continue aux sulfates par rapport à ceux exposés aux sulfates et aux cycles de mouillage-séchage est moins important [Por72]. Les cycles mouillage-séchage simulent les conditions auxquelles sont soumises les composites cimentaires dans les zones de marée représentant ainsi l'état le plus critique. Une couche de sel insoluble dense se forme autour du corps attaqué par les sulfates, cette couche est constituée par l'Oxalate de calcium offre un effet protecteur, il est utilisé dans la pratique à des fins de protection [Sah07].

4.4.1.4 Mesure du pH des solutions acide de sulfate de sodium

Selon plusieurs auteurs, à savoir Kumar et Brown, un pH constant est l'un des critères souhaitable pour l'essai, il permet de simuler les conditions d'exposition voulant être étudiés, tel que l'eau de mer. Dans le cas échéant, le cas de la présente recherche, les essais sont réalisés à un pH variable pour prédire la résistance des bétons légers aux sulfates dépendant de la sévérité des conditions d'exposition. Le pH de la solution, doit être proche du pH de l'exposition réelle, dans le cas contraire l'essai ne révèle pas les mêmes mécanismes de détérioration susceptibles d'être produites [Kum74 ; Bro81].

En raison de son importance à l'égard de la durabilité des composites cimentaires, ces mesures du pH sont

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

prises dans ce travail de recherche, en utilisant l'indicateur pH en papier (figure 4.12), étant la seule méthode disponible au laboratoire, malgré qu'elle n'est pas une méthode de haut niveau en termes de précision.



Figure 4.12 Solution de l'acide Na_2SO_4 contenant des éprouvettes pour mesure du pH.

Les moyennes des résultats de changement du pH des solutions d'acide en fonction du temps d'exposition et selon le type des bétons légers mesurés chaque 30 jour quatre fois par jours, sont présentés sur le tableau 4.1.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

	Solution de contrôle : Eau distillé (pH)					Solution 5% d'acide de sulfate de sodium Na_2SO_4 (pH)				
	Avant l'immersion	03 heures après	01 mois après	02 mois après	03 mois après	Avant l'immersion	03 heures après	01 mois après	02 mois après	03 mois après
B _{réf}	7	7/8	8/9	9/10	11/12	5/6	6/7	7/8	8/9	9/10
BC _{g10}	7	7/8	7/8	8/9	11/12	5/6	5/6	6/7	8/9	9/10
BC _{g7,5}	7	7/8	7/8	8/9	11/12	5/6	5/6	6/7	7/8	8/9
BC _{g5}	7	7/8	8/9	8/9	11/12	5/6	5/6	6/7	7/8	8/9
BC _{m10}	7	7/8	7/8	8/9	11/12	5/6	6/7	7/8	8/9	9/10
BC _{m7,5}	7	7/8	7/8	8/9	11/12	5/6	6/7	7/8	8/9	9/10
BC _{m5}	7	7/8	7/8	8/9	11/12	5/6	5/6	6/7	8/9	8/9

Tableau 4.1 Evolution du pH des solutions d'acide de sulfate de sodium en fonction du temps d'immersion.

Ces résultats, ont montré que les solutions d'acide ont passé d'un pH = 5 à 6 avant le début de l'essai à un pH = 6 à 7, trois (03) heures après l'immersion des éprouvettes. Les valeurs du pH changées sans cesse durant les trois (03) mois d'essai, à la fin de cette période, il atteint les valeurs de 9 à 10 pour le B_{réf}, BC_{g10}, BC_{m10} et BC_{m7,5}, alors que les autres solutions d'acide contenant les bétons légers caoutchouté BC_{g7,5}, BC_{g5} et BC_{m5}, ont présenté un pH d'une moyenne de 8 à 9 à la fin de l'immersion. Une variation de pH est traduite par le changement de la solubilité des différents éléments, ce qui peut influencer la stabilité de la matrice cimentaire [Bar92]. Ce changement du pH, signifie aussi que l'agent agressif (l'ion sulfate SO_4^{-2}) se neutralise partiellement et progressivement par la présence des éprouvettes cimentaires. L'alcalinité des solutions d'immersion a augmenté avec le temps (pH supérieur à 7) d'où la déstabilisation de l'équilibre chimique des hydrates sous l'effet de la dissolution de la portlandite et par conséquent la diminution de l'agressivité de la solution acide. En effet l'action des acides (des substances agressives) sur le béton durci (substances réactives), provoquent la conversion de toutes les composantes de calcium: l'hydroxyde de calcium, le silicate de calcium hydraté et aluminat de calcium hydraté sels de calcium, en raison de la présence d'hydroxyde de calcium dans la pâte du ciment Portland hydraté, quand il entre en contact avec les ions sulfates.

Le béton est un milieu fortement basique avec un pH de 13 en contact avec un milieu acide ayant un pH inférieur à 7, la réaction acido-basique conduit à la formation des sels de calcium, aluminium, fer, magnésium, soluble à très solubles dans l'eau. L'agressivité de l'attaque dépend de la solubilité des sels formés, c'est-à-dire, de l'espèce acide et du pH de la solution d'attaque [Lid92].

En comparaison du pH des solutions d'immersion des différents bétons légers caoutchouté avec celle de béton léger de référence, on observe que cette dernière est légèrement plus alcaline que les autres, ceci est constaté dès le début de l'essai d'immersion dans cette expérience. L'augmentation de pH tout au long de la période de l'immersion, se fait pratiquement avec des cinétiques semblables (tableau 4.1).

Un milieu basique ayant un pH de 12 à 13, alors que tout autre milieu dont le pH inférieur peut être considéré comme agressif [Esc08]. Ce qui est observé est que les détériorations constatées sur les éprouvettes attaquées par la solution acide de sulfate de sodium, ont été produites pendant les deux premiers mois ce qui est

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

évident par rapport aux résultats du pH. La détérioration des composites cimentaires augmente à mesure que la valeur du pH de l'acide, est inférieure à 6,5 [Fat88]. Ceci explique que les pertes de masse constatées lors de cet essai, sont dues à l'attaque de la solution acide ayant un pH inférieur à 7 puisque la cinétique des dégradations a été lente dès que le pH a atteint la valeur 9.

En ce qui concerne les éprouvettes immergées dans le milieu de contrôle (Eau distillée) à un pH de l'ordre de 7, le pH de l'eau dans laquelle les éprouvettes de bétons légers de référence et ceux caoutchoutés a changé progressivement, il a atteint un pH = 12 après trois (03) mois d'immersion. Les éprouvettes sont intactes, on ne trouve aux fonds des bacs qu'une quantité de mortier altérée presque négligeable. La couche de surface des éprouvettes immergées dans l'eau distillée, est relativement différente de la couche des éprouvettes attaquées par les sulfates, cette couche est fragile, ayant une couleur blanche due à l'accumulation des sels avec des taches légèrement jaunâtres.

Les bétons légers caoutchoutés, ont montré une résistance accrue contre l'attaque Na_2SO_4 due aux caractéristiques particulières des granulats de caoutchouc. Le béton de référence présente des pertes de masse plus importantes par rapport aux bétons légers caoutchoutés. En conclusion, la meilleure façon pour introduire les granulats de caoutchouc dans les bétons légers pour avoir de meilleures performances vis-à-vis à l'attaque par acide de sulfate de sodium à une concentration de 5% est de rassembler les granulats de caoutchouc gros et fins à la fois à un taux de substitution entre 7,5 et 10%.

4.4.2 Attaque par acide chlorhydrique au béton léger caoutchouté (ASTM C 267)

Afin de mettre en évidence la résistance des composites cimentaires à l'attaque par acide chlorhydrique (HCl), sept (07) éprouvettes préparées à cette fin (figure 4.13), âgés de cinq (05) ans, ont été immergées dans une solution de 5% de cet acide et sont examinées par mesure de changement massique et par évaluation des détériorations produites en fonction du temps d'immersion. En parallèle, sept (07) autres éprouvettes des différentes compositions, avec et sans caoutchouc, ont été mises dans de l'eau distillée, étant un milieu de contrôle d'alcalinité, permettant d'évaluer le pH dans un milieu neutre qui nous aidera à mieux évaluer l'influence de la composition du béton en matière de granulats sur le milieu où elle existe. Les dernières sept (07) éprouvettes, ont été stockées et conservées séparément à la température du laboratoire dans la solution acide chlorhydrique concentrée à 5%, afin de suivre l'évolution du pH. Ces mesures, ont été prélevées trois (03) heures après le début de l'immersion dans la solution acide chlorhydrique et après chaque mois, correspondant au renouvellement de la solution acide (quatre lectures par jours en moyenne), jusqu'au la fin de l'essai à 90 jours.

Pendant toute la période d'essai, pendant trois (03) mois (90 cycles), des examens visuels ont été faites, considérant les mécanismes de dégradation pouvant se produire lors de cette immersion, permettant de qualifier la relation entre la durabilité de ces bétons légers et le milieu contenant l'acide chlorhydrique. La solution est renouvelée chaque quinze (15) jours pour les mesures de pertes de masse, afin d'assurer la sévérité de la solution acide, alors que celles destinées pour le contrôle du pH sont maintenues et nettoyées (filtrées) durant toute la période d'essai.

Cet essai, consiste à immerger pendant six (06) heures, le béton léger de référence et ceux incorporant des granulats de caoutchouc dans une solution acide chlorhydrique d'une concentration de l'ordre de 5%, préparée dans

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

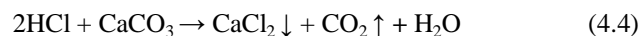
un laboratoire de chimie. Les éprouvettes sont ensuite lavées à l'eau du robinet après chaque retrait de la solution acide, pour éliminer les matières altérées et laissées égoutter pendant une demi heure à l'air libre, puis séchées pendant dix huit (18) heures dans une étuve à 60°C, afin d'accélérer leur vieillissement, ensuite elles sont pesées après chaque mouillage et séchage. Les mesures de masses et les examens visuels ont eu lieu durant trois (03) mois. En effet, la période d'immersion peut être 3, 6, 9 et 12 mois, cependant dans cette recherche, on a choisit trois (03) mois en raison de restriction de temps.



Figure 4.13 Éprouvettes immergées dans la solution de l'acide chlorhydrique (HCl).

4.4.2.1 Résultats et interprétations

Le premier contact entre l'acide chlorhydrique et les éprouvettes de bétons légers a montré une forte effervescence qui a duré un bon moment, surtout dans le cas de l'échantillon du béton de référence. Le gaz dégagé est le bioxyde de carbone. La réaction déroulée se traduit comme suit :



Durant la période d'exposition, ce dernier a enregistré des pertes de masses valant entre 6,19% et 34,17%, elle s'accroît à 31 jours d'exposition dans la solution acide chlorhydrique, en passant de 13,35% au 30^{ème} jour à 23,75% au 31^{ème} jour, ensuite, elle augmente avec le temps. Au 90^{ème} jour d'immersion, il perd environ 33,17% de sa masse initiale. La même cinétique de perte de masse, a été suivie par les bétons légers caoutchoutés, ils ont enregistré un maximum de perte de masse à 31 jours avec une augmentation durant les 90 jours d'exposition à l'acide chlorhydrique.

Pendant toute la durée de l'attaque, en plus du béton léger de référence, BCm10 a enregistré les pertes de masse les plus importantes, allant de 7,83% au 1^{er} jour à 31,93% à 90 jours, alors que BCg10 et BCg7,5 ont marqué le minimum des pertes de masse, valant entre 6,62% et 7,31%, respectivement au 1^{er} jour et d'environ 29,36% et 30,20%, respectivement au 90^{ème} jour. BCg5, BCm5 et BCm7,5, ont presque perdus la même quantité de leurs poids, dans la plage de 31,36 à 32,73% durant le dernier cycle d'immersion (figure 4.14).

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

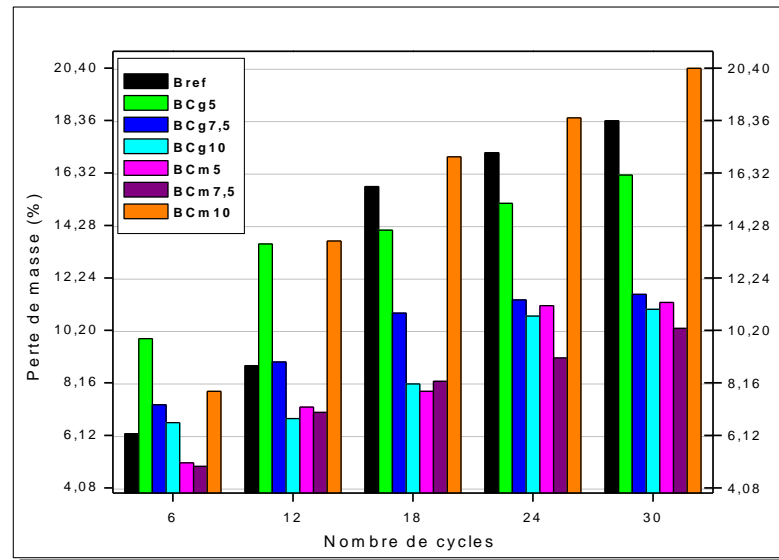


Figure 4.14 Evolution des pertes de masse jusqu'aux 30 cycles d'attaque de HCl [Med17].

Il ressort des figures 4.15 et 4.16 que l'exposition de ces éprouvettes à cet acide est préjudiciable pour le béton léger de référence plus que ceux caoutchoutés. L'attaque de l'acide chlorhydrique aux bétons légers étudiée, a diminué avec le temps. Les pertes de masses constatées pendant les derniers cycles, les douze (12) derniers en particulier, ont progressées très lentement, suite à la formation d'une couche molle et assez consistante couvrant les éprouvettes testées, qui a atténué l'effet de l'acide. Les pertes de masses, enregistrées lors de l'étude des bétons légers caoutchoutés sont moins significatives par rapports au béton léger de référence. La réduction des pertes de masse est en relation directe avec la teneur du caoutchouc introduit dans les mélanges, la composition (BCg) en particulier BCg7,5 et BCg10, a enregistré des changements massiques moins importants que ceux de la composition (BCM). Dans la moyenne, on peut noter que c'est BCg10 qui a perdu le moins de sa masse initiale après la même période d'immersion suivie par BCg7,5.

Il est observé que les quantités des pertes de masses enregistrées, sont un peu aléatoires, sauf celles obtenues aux cycles 16, 31, 46, 61 et 76 correspondant au renouvellement de la solution acide chlorhydrique où elles augmentent significativement. Ceci confirme, que plus la concentration est forte plus la solution est agressive. Donc, le milieu du béton léger caoutchouté est fortement agressif avec une source de renouvellement de l'acide chlorhydrique, l'attaque serait très nuisible. L'essai a démontré la forte solubilité de l'acide chlorhydrique dans l'eau qui réagit rapidement avec le ciment portland en libérant une partie considérable de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ce dernier, réagit à son tour avec l'acide chlorhydrique et forme par la suite le chlorure de calcium CaCl_2 , qui détériore les éprouvettes et provoque une perte de masse qui se traduit par la formation d'une couche poreuse avec une légère perte de masse [Mac09]. Donc, cette perte de masse est due à la dissolution des hydrates formés menant à des matériaux visuellement poreux de texture différente (création d'un réseau poreux ouvert à la surface du matériau). Donc la dégradation est liée non seulement à la concentration des acides mais aussi à leurs solubilités.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

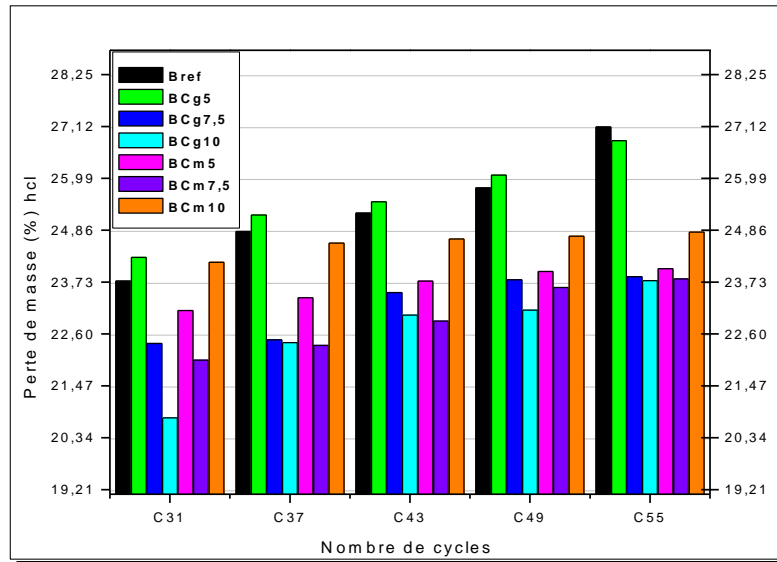


Figure 4.15 Evolution des pertes de masse jusqu'aux 55 cycles d'attaque de HCl [Med17].

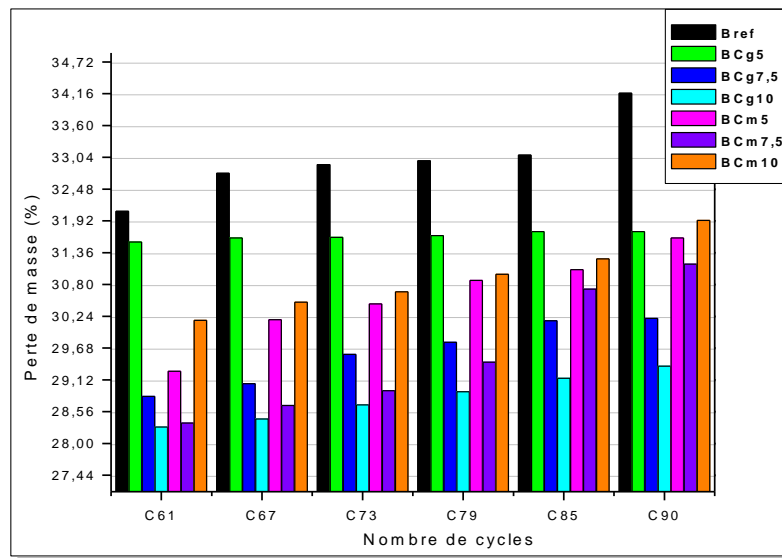


Figure 4.16 Evolution des pertes de masse jusqu'aux 90 cycles d'attaque de HCl [Med17].

L'examen visuel des bétons légers exposés à cet acide et la quantification des pertes de masses induites, sont des moyens pour évaluer les détériorations produites. Comme le montre la figure 4.17, on ne voit pas de fissures produites au niveau des éprouvettes après une durée d'exposition de 90 jours, sauf au niveau du BCg5 où on constate une fissure assez profonde. La texture des granulats de caoutchouc est devenue rugueuse, la qualité d'interface pâte/granulats de caoutchouc non traité et l'attaque chimique n'ont pas affecté leur liaison avec la matrice cimentaire. Par leur qualité amorphe, ils n'ont pas facilité la pénétration de la solution acide (HCl) à l'intérieur des échantillons testés, ils ont atténué l'absorption de la solution acide et ont réduit par conséquent la perte de masse. Ceci, prouve que les composites cimentaires incorporant ces granulats, ont un bon comportement face aux attaques chimiques. Ils développent une résistance meilleure par rapport à celle du béton léger sans caoutchouc. La résistance à l'attaque par

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

l'acide chlorhydrique des composites cimentaires est améliorée. Selon les résultats, l'imperméabilité des granulats de caoutchouc attribue au blocage du passage de la solution agressive et réduit l'absorption de la solution acide par les bétons légers. En effet, c'est une indication sur le fonctionnement des granulats de caoutchouc comme des pores fermés, ce qui limite l'entrée des agents agressifs à l'intérieur des mélanges.

Visuellement, les surfaces attaquées par l'acide chlorhydrique, sont jaunâtre, ceci est due à la présence du chlorure de calcium (CaCl_2) et de l'hydroxyde de fer recouvrant les surfaces. Cette coloration est due à la formation de l'ettringite dans les zones dégradées [Mac09].

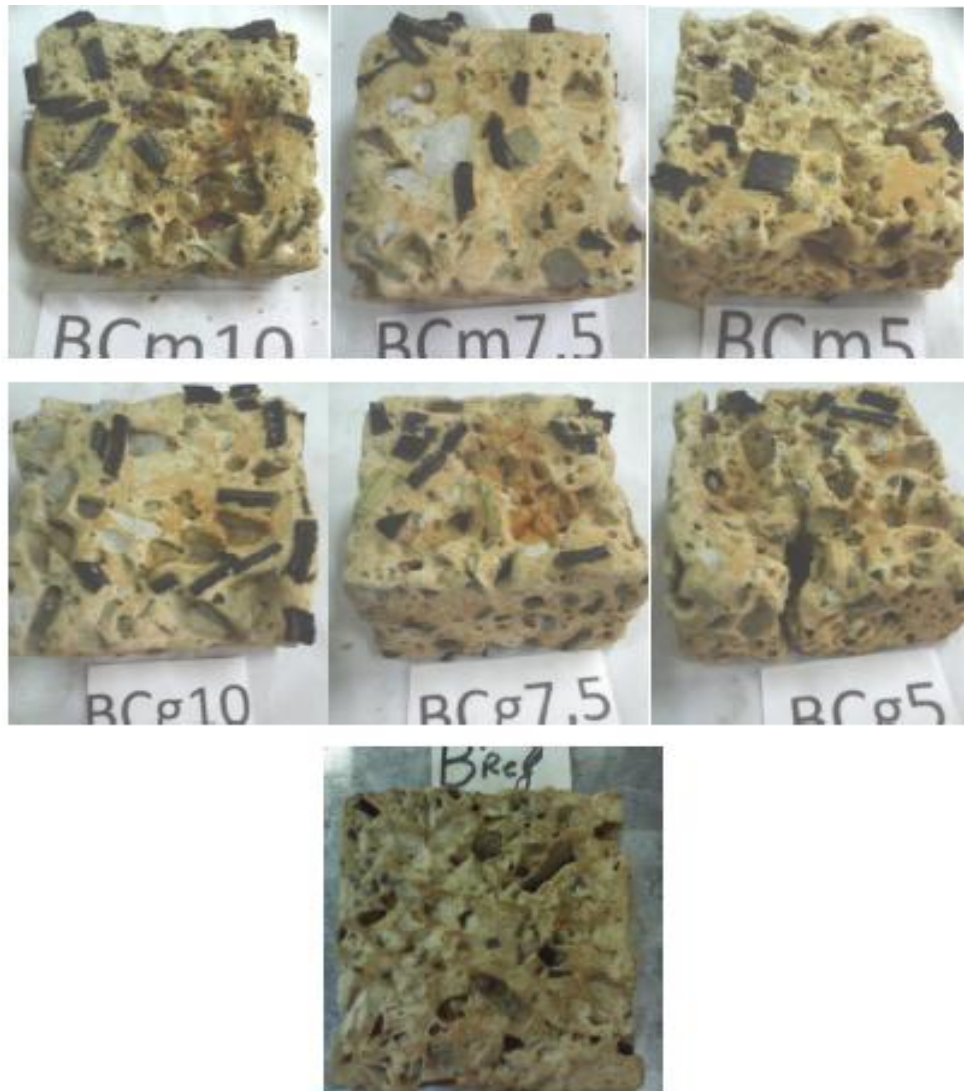


Figure 4.17 Eprouvettes de bétons légers caoutchoutés et de référence, après 90 cycles d'immersion dans HCl [Med17].

Les gros granulats naturels, se trouvant aux surfaces des éprouvettes en particulier, se sont détachés des éprouvettes et ont laissé des cavités à leurs places. L'effet combiné de l'attaque continue du HCl et l'exposition au changement cyclique mouillage-séchage, ont affecté la structure superficielle des spécimens testés et ont engendré, par conséquent, des pertes d'enrobage de ces granulats. Ce détachement de matières, entraîne des modifications des propriétés du matériau, telle que l'augmentation de la perméabilité, augmentant à son tour la capacité de l'agent agressif à s'infiltrer à l'intérieur des éprouvettes testées.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

La porosité du béton résultante de proportions utilisées, le rapport E/C élevé, les mauvaises conditions de murissement (à l'air libre) et les cycles alternés de mouillage-séchage, sont la cause de la réduction de la résistance à la détérioration des composites cimentaires [Moh97]. Ainsi, la taille et la nature des granulats de caoutchouc contenant des additifs stabilisant sa structure l'empêchant de réagir en présence des produits chimiques, sont à la faveur de leur bonne tenue face à l'attaque de cet acide. En outre, la nature et le degré de la sévérité des agents chimiques sur la détérioration de la pâte de ciment durcie et du béton, dépend de la composition chimique et de la structure interne de ce dernier [Pop89].

4.4.2.2 Couche atteinte par l'acide chlorhydrique HCl

La structure des éprouvettes de bétons légers étudiés suite à l'attaque de HCl, est divisée en trois zones principales, zone en bon état, la zone de mélange de l'hydroxyde et la zone attaquée de couleur très différente. Cette dernière est divisée en deux couches; une couche dissoute dans la solution et une autre dégradée non dissoute dans les différentes éprouvettes testées. Les mesures des épaisseurs de ces couches sont un vrai problème. Ces éprouvettes ont gardé plus au moins leurs formes cubiques après l'immersion, mais leurs dimensions ont diminué, elles sont devenues irrégulières avec des granulats saillants dans leurs cotes. Le tableau 4.2, présente les changements dimensionnels mesurés en (mm).

	Epaisseur atteinte (mm)	Couche dégradée (mm)	Couche dissoute (mm)
Bréf	25	20	05
BCg10	14	09	05
BCg7,5	16	10	06
BCg5	24	15	09
BCm10	21	16	05
BCm7,5	20	12	08
BCm5	19	13	06

Tableau 4.2 Changement dimensionnel des bétons légers attaqués par l'acide chlorhydrique HCl.

A la fin de l'essai, la dégradation des éprouvettes de béton léger incorporant du caoutchouc, a été moins importante que celle observée sur le béton léger de référence. Ce qui est observé sur le tableau 4.2, est que la couche atteinte est moins importante lorsqu'il s'agit des bétons légers caoutchoutés. La présence des granulats de caoutchouc, a amélioré la résistance de leurs parties exposées à l'attaque chimique de l'extérieur par diminution de l'absorption de la solution acide. Cependant, on conclue que l'incorporation des granulats de caoutchouc augmente la résistance chimique des composites dans les milieux agressifs [Ben11 ; Ghe12]. La dégradation se propage à partir de la surface et se traduit par une perte de masse et une dégradation des propriétés mécaniques, avec une augmentation des propriétés de transfert susceptible d'amplifier ces dégradations. L'augmentation de la porosité des zones en contact avec l'acide, est produite par la formation du CaCl_2 suite à la réaction du HCl avec la pâte de ciment hydratée. Avec le temps, elle augmente de façon significative car le calcium, est retiré de la structure des mélanges exposés à l'attaque chimique. Les grandeurs pouvant caractériser l'évolution de la réaction en fonction du temps ou de la profondeur de pénétration, sont la concentration en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et le pH de la solution interstitielle du béton.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

4.4.2.3 Evolution du pH de la solution acide chlorhydrique

L'influence du temps d'immersion sur le changement du pH, est également étudiée pour évaluer la vitesse de dégradation. Le béton a un pH basique allant de 12 à 13, alors n'importe quel autre milieu dont le pH est inférieur peut être considérée comme agressif pour ce matériau, en raison de la solubilité des hydrates qui augmente fortement en milieu acide, telle que la portlandite.



Figure 4.18 Le suivi de l'évolution du pH de la solution de 5% d'acide chlorhydrique (image correspondante à 85 cycles).

Le changement rapide du pH, reflète l'effet de la dissolution de la portlandite, ce qui provoque la diminution rapide de l'agressivité chimique du milieu de l'immersion, c'est pour cette raison, que l'évolution du pH, a été suivie et mesuré chaque 30 jour (figure 4.18) par indicateur de pH en papier. Les solutions acide, sont maintenus afin d'évaluer leurs concentrations durant les 90 jours d'essai. Le Tableau 4.3, regroupe l'ensemble des valeurs du pH des différentes solutions d'immersion des éprouvettes dans l'acide chlorhydrique et de l'eau distillé contenant les bétons légers de référence et ceux caoutchoutés testées, au début et à la fin de l'expérience.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

	Solution de contrôle : Eau distillé (pH)					Solution 5% d'acide chlorhydrique (pH)				
	Avant l'immersion	03 heures après	01 mois après	02 mois après	03 mois après	Avant l'immersion	03 heures après	01 mois après	02 mois après	03 mois après
Bréf	7	7/8	8/9	9/10	10/11	1	1/2	3/4	5/6	7/8
BCg10	7	7/8	7/8	8/9	9/10	1	1/2	3/4	3/4	5/6
BCg7,5	7	7/8	7/8	8/9	9/10	1	1/2	3/4	3/4	5/6
BCg5	7	7/8	8/9	8/9	10/11	1	1/2	5/6	5/6	5/6
BCm10	7	7/8	7/8	8/9	9/10	1	1/2	3/4	3/4	5/6
BCm7,5	7	7/8	7/8	8/9	9/10	1	1/2	3/4	3/4	5/6
BCm5	7	7/8	7/8	8/9	9/10	1	1/2	3/4	3/4	5/6

Tableau 4.3 Evolution du pH de la solution acide chlorhydrique de 5% durant l'immersion des éprouvettes testées.

Selon ces résultats, après 30 jours d'immersion, le pH des différentes solutions acides commence à changer légèrement et progressivement, jusqu'à 90^{ème} jour où il se situe entre 1 et 8 pour le béton léger de référence. Après l'immersion des échantillons, les valeurs du pH ont augmenté progressivement avec le temps. Les solutions acides chlorhydriques, ont été affectées par la réaction de la matrice cimentaire. Après trois heures d'immersion, les pH des solutions n'ont pas changé (pH= 1 à 2). A 30 jours, ces valeurs, ont légèrement augmenté en enregistrant un pH entre 2 à 3, ceci montre que les solutions ont été toujours sévèrement agressives, d'une part et que la réaction a été produite dans ce temps entre les bétons légers testés et la solution acide d'une autres part.

L'évolution du pH de la solution de contrôle contenant l'eau distillée a été lente avec un pH de 7 à 8 pour l'ensemble des bétons légers testés. Ceci a été expliqué, par le fait que le pH du béton et même celui de l'eau contenu dans les pores du béton, est d'environ 13.5, lorsque l'eau entourant le béton s'infiltre à l'intérieur, elle provoque la dissolution d'ions (Ca^{2+}), ce qui libère des ions (OH^-) et engendre une augmentation du pH de l'eau [Des11].

A la fin de l'essai, les valeurs du pH des bétons légers immergés dans l'eau distillé, sont comprises entre 10 et 11, pour les échantillons de béton léger de référence et BCg5, les autres éprouvettes testées, ont enregistré un pH de l'ordre de 9 à 10. En ce qui concerne les solutions d'acide, à 90 jours, le pH du béton de référence a été le plus élevé (pH =7 à 8), alors que les autres solutions avaient un pH de l'ordre de 5 à 6. On constate que les bétons de ciment et de granulats naturels, sont plus réactifs avec la solution acide, le caoutchouc a prouvé qu'il est inerte.

L'agressivité de l'attaque, est dépendante de la quantité de ciment puisque la capacité de la matrice cimentaire à neutraliser l'acide sera beaucoup plus importante si sa teneur en ciment [Mou58] et en granulats minéraux est élevée. Le flux d'ions transportés, engendre d'une part la dissolution des hydrates formés et la formation de nouveaux composés menant à la dégradation progressive du béton d'une autre part. La réaction acido-basique produite conduit à la formation des différents sels : de calcium, aluminium, fer, magnésium, solubles à très solubles dans l'eau. L'agressivité de l'attaque dépend aussi de la solubilité des sels formés, c'est-à-dire de l'espèce acide et du pH de la solution d'attaque [Wea86 ; Lid85].

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

La variation du pH, signifie un changement dans la solubilité des différents éléments, ce qui peut influencer la stabilité de la matrice cimentaire. L'équilibre des hydrates, va se déplacer afin de tenter un nouvel état d'équilibre s'effectuant dans les phases aqueuses des pores capillaires. Ceci, se traduit par un certain nombre d'échanges et de transferts par diffusion. Cette dernière sera plus lente lorsque la tortuosité sera plus grande [Bar92].

Les mesures du pH ont montré que les solutions ont passé de solutions acides d'un pH = 1 à 2 à une solution plus au moins alcalines de pH = 7 à 8 pour le béton léger de référence et un pH de 5/6 pour les bétons légers caoutchoutés. Kumar et al., ont signalé dans leur recherche que le béton de ciment portland, ne résiste pas aux acides et aucun béton hydraulique ne tiendra pour longtemps s'il est exposé à une solution à un $\text{pH} \leq 3$. Aussi, ils ont montré que la portlandite s'initie en dessous d'un pH de l'ordre de 12.5 [Kum93]. Les silicates de calcium, sont solubles à partir d'un pH de l'ordre de 9, lorsque le pH est supérieur à cette valeur, la cinétique de dégradation sera lente. Dans cette recherche ceci, est correspondant aux cycles où on a constaté des pertes de masses moins importantes, c'est pourquoi le renouvellement des solutions d'immersion des éprouvettes destinées pour le suivi du changement massique a été effectué chaque 15 jour.

Les bétons légers de la composition formulés en substituant le gravier et le sable à la fois par des granulats de caoutchouc, exposés à l'acide chlorhydrique pendant 90 jours sont plus durable que ceux formulés en substituant partiellement le gravier seul. Le plus intéressant dans un essai, est de s'approcher plus à la réalité des mécanismes du phénomène naturel visé dans l'étude, afin de le mieux reproduire sans que la durée de l'essai perturbe les résultats. Le concepteur doit être informé des mesures d'atténuation nécessaires pour réduire les impacts environnementaux. Il peut également conduire à l'élaboration d'exigences moins strictes pour l'utilisateur des granulats de caoutchouc lorsque le milieu est agressif.

4.5 Emission acoustique

Les mesures de la vitesse d'impulsion ultrasonores, semblent être une nouvelle voie très prometteuse pour le contrôle et l'évaluation non destructive des composites cimentaires [Kod08]. Garnier et al., ont démontré que la caractérisation non destructive des structures en béton par propagation d'ondes ultrasonores permet de diagnostiquer une pathologie ou un état du matériau [Gar09].

Donc la vitesse d'impulsions ultrasonores représente le paramètre non destructif le plus répandu pour l'auscultation du béton, elle constitue un moyen rapide et facile pour la détermination des propriétés d'un béton. Elle a montré, son efficacité dans la distinction entre les qualités des bétons, à savoir, son hétérogénéité même lorsqu'ils sont issus du même gâchée et conservés dans des conditions similaires. Elle a aidé à détecter et à localiser l'endommagement et à identifier les défaillances et a servie pour contrôler la corrosion [HO10]. Ainsi, elle est bénéfique en termes de réduction du temps d'intervention pour l'entretien et la préservation de la vie de l'ouvrage [Mor13]. Elle a fait ses preuves dans l'évaluation des bétons dégradés, plusieurs travaux, ont évalué le comportement d'une onde ultrasonore se propageant dans un milieu ayant subi un traitement thermique (choc thermique ou cycles gel/dégel) [Bou11].

4.5.1 Facteurs influençant la vitesse d'impulsion ultrasonore

La structure interne des composites cimentaires, est très complexe et peut être considéré comme étant

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

composé de pâte de ciment, des granulats minéraux, et l'interface entre ces deux composants, ce qui fait d'eux des matériaux poly-phasique, autrement dit, des composites hétérogènes au niveau microscopique et macroscopique.

Il y a plusieurs facteurs importants, qui influent sur les valeurs de la vitesse d'impulsion ultrasonores dans le béton, à savoir la porosité du béton, le type des granulats et leurs caractéristiques [Agh13]. La vitesse de déplacement d'impulsions ultrasonores dans un béton dépend aussi de la densité et de l'élasticité du matériau. Il est important de tenir compte de tous les facteurs et leur corrélation avec les propriétés physiques, afin que la vitesse d'impulsion soit dépendante, exclusivement, des propriétés du matériau testé [Cas98].

4.5.2 Facteurs influençant l'élasticité du béton

La vitesse de l'impulsion ultrasonore, est souvent utilisée pour l'évaluation de la qualité globale des matériaux, et la détermination de leurs propriétés élastiques [Mar05], tels que la porosité et la compacité. Un béton contenant des granulats non poreux, ayant un module d'élasticité et une densité élevés, sont des éléments importants dans la détermination de sa rigidité. Le module d'élasticité et les propriétés de la pâte de ciment, sont complètement déterminés par le rapport E/C, quand ce dernier diminue le module d'élasticité augmente [Top07]. Les propriétés de la pate du ciment, sont parmi les facteurs de base affectant le module d'élasticité du béton [Kum06].

Topçu et al., ont résumé dans la figure 4.19, les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité du béton, selon la même figure, la totalité de ces facteurs sont relatifs à ces composants, tels que la nature des granulats (leur porosité, module d'élasticité et leur proportion), la pate de ciment et la zone de transition entre les deux.

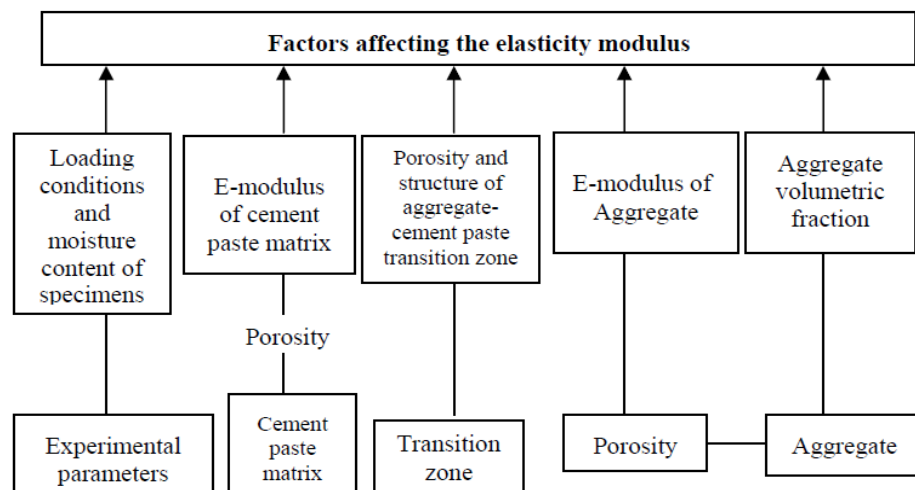


Figure 4.19 classification des facteurs affectant le module d'élasticité [Top07].

Le module de Young est une propriété très importante en raison de son influence sur les matériaux, il doit être connu pour tous les travaux de conception ou de simulation du comportement de la structure. Dans le cas du béton, la valeur du module de Young est liée à la résistance à la compression. La surveillance de ce paramètre est donc importante [Kha99].

4.5.3 Essai d'évaluation de l'émission acoustique

Le principe de l'essai, est de mesurer le temps mis par une onde ultrasonore, pour parcourir une distance connue. Dans cette partie de l'étude, les tests ultrasoniques, ont été réalisés conformément à la norme ASTM C 597, en utilisant un appareil constitué d'un générateur d'impulsions électriques, d'une paire de transducteurs, d'un amplificateur et d'un dispositif électronique de mesure de temps permettant de mesurer la durée écoulée entre le départ d'une impulsion générée par le transducteur-émetteur et son arrivée au transducteur-récepteur. Le transducteur électro-acoustique, a été maintenu au contact de la surface du spécimen testé (figure 3.10). Après avoir parcouru une longueur connue dans le béton, le train de vibrations est converti en signal électrique par un deuxième transducteur placé sur la face opposée de la même éprouvette. Les compteurs électroniques de mesures du temps permettent de mesurer le temps de parcours de l'impulsion.

La vitesse d'impulsion ultrasonique, a été calculée par la formule (3.8). Chaque valeur de mesure présente la moyenne de trois mesures ou plus.

4.5.4 Résultats et interprétation :

L'évaluation des vitesses d'impulsion ultrasonores des bétons légers testés à 28 jours a été faite en 2011 (Partie 3.6.4) et refaite au fil du temps. Les résultats sont discutés dans la partie qui suit.

Les résultats de la première évaluation, ont été discuté dans le chapitre précédent (partie 3.7.2.4). Les résultats de la deuxième évaluation sont représentés dans la figure 4.20. Ils ont montré, une augmentation des vitesses, elles sont de l'ordre de 3887,42 m/s, 3643,21m/s et 3467,63 m/s pour BCg5, BCg7,5 et BCg10, respectivement, tandis qu'elles sont de l'ordre de 3591,6 m/s, 3421,42m/s et 3216,71 m/s pour BCm5, BCm7,5 et BCm10, respectivement, alors que le béton de référence a enregistré 4261,23 m/s. Ce qui est constaté, est que les bétons légers caoutchouté de la composition (BCm) ont présentés des vitesses de son les moins importantes, par rapport à ceux de la composition (BCg) ainsi que le béton de référence.

Ces constatations, ont été enregistrées lors de l'évaluation faite à 28 jours (figure 3.25). Ce qui est observé aussi lors de la comparaison des résultats des vitesses d'impulsion, est qu'à un âge plus avancé des bétons légers les vitesses, ont augmenté. Cet augmentation, est d'environ 8,77%, 14,50% et 18,63% pour BCg5, BCg7,5 et BCg10, respectivement, et 15,72%, 19,71% et 24,52% pour BCm5, BCm7,5 et BCm10, respectivement.

Ceci, montre que l'association de la poudrette et granulats de caoutchouc remplaçant partiellement les granulats naturels, contribue à l'amélioration de la l'absorption acoustique plus que l'incorporation des granulats de caoutchouc grossiers seulement. Cependant, l'explication qui peut être avancée, est que l'action de l'ajout des granulats de caoutchouc fins en plus de la teneur élevé en caoutchouc (BCm), a un effet significatif sur les propriétés acoustique des bétons légers caoutchoutés à court et à long terme. Ces différences, peuvent avoir des conséquences sur leur durabilité. Par la présence de ces granulats, les matériaux sont devenus plus légers et plus poreux, puisque le caoutchouc incorporé a crée de l'air dans la matrice cimentaire, qui leur confère des propriétés d'absorption acoustique élevée.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

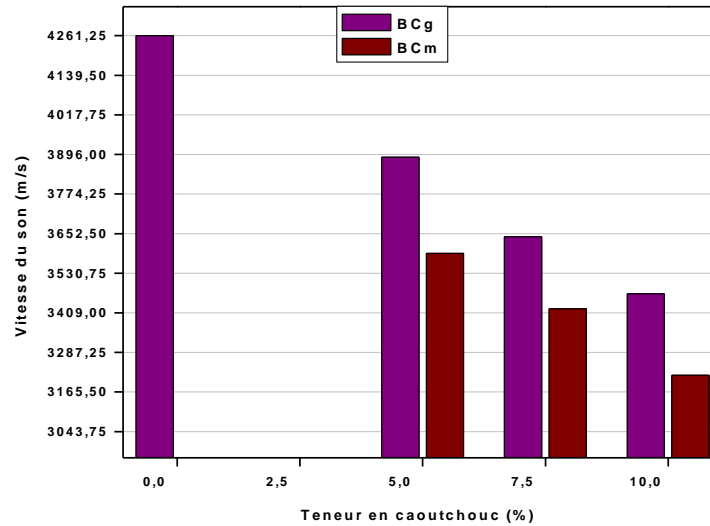


Figure 4.20 Variation de la vitesse du son dans des éprouvettes âgées de cinq (05) ans

En effet, la structure interne des composites cimentaires est complexe, ils peuvent être, considérés comme des composites hétérogènes aux niveaux microscopique et macroscopique. Cette hétérogénéité, rend le comportement des ondes ultrasonores dans le béton très irrégulier [Pra03]. Donc, l'une des raisons de variabilité des résultats de la littérature, est la structure interne des mélanges caoutchoutés suite à la distribution aléatoire de ces derniers, due à la tendance de ces granulats à venir se loger à une faible profondeur de la surface ou même à la surface. Ainsi, les chemins des ondes soniques, ne sont pas les mêmes et ne sont pas toujours brisés ou amortis par un granulats de caoutchouc. Un chemin plus long de ces ondes rend leurs temps de passage à travers le matériau plus important et leurs vitesses s'en trouvent réduites par conséquent [Tob67].

Le temps de passage dans les bétons légers âgés de cinq (05) ans, a augmenté en raison de la nature des particules de caoutchouc et leur tendance à piéger l'air dans leurs surfaces rugueuses. Ainsi, à l'âge de 28 jours (figure 3.25), les bétons légers testés ont été traversé par les ondes du son plus rapidement que ceux âgés de cinq (05) ans (figure 4.21). Ceci, est justifié par la diminution de la compacité des composites cimentaires avec le temps.

En réalité, ces cinq (05) années ne sont pas capables de décrire ou prédire avec précision l'effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés acoustique de ces bétons légers. On remarque, que la vitesse d'impulsions ultrasonores dans les deux compositions de bétons légers est d'autant plus grande que ce dernier est plus âgé, ce qui est en corrélation aussi avec l'évolution de la compacité en fonction du temps [HO10].

Les résultats du module d'élasticité, ont suivi le même scénario d'évolution durant cet essai. La figure 4.22, montre l'effet des différents niveaux de remplacement en caoutchouc sur les valeurs de ce module.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

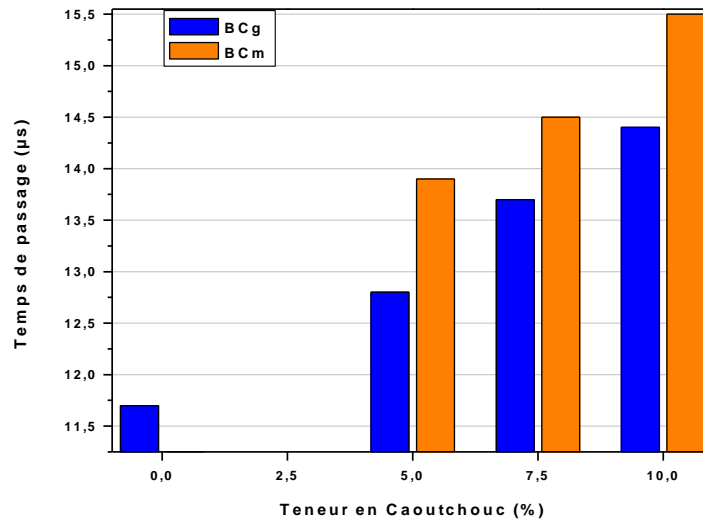


Figure 4.21 Variation du temps de passage de l'onde sonore dans les éprouvettes âgées de cinq (05) ans.

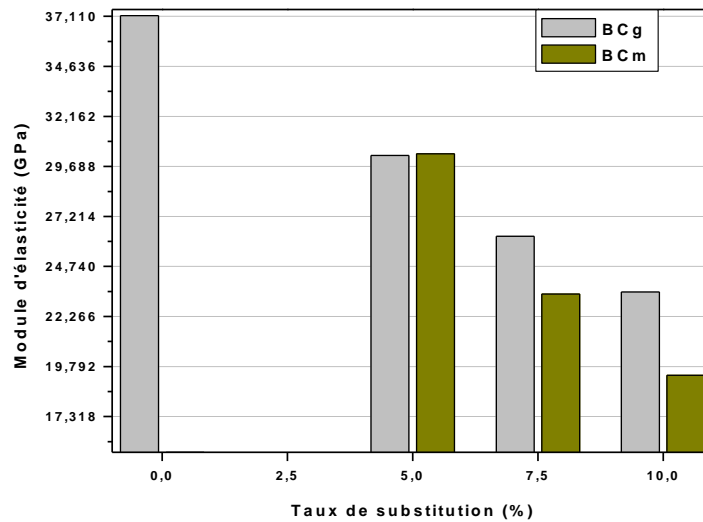


Figure 4.22 Evolution du module d'élasticité des bétons légers âgés de cinq (05) ans.

Selon cette figure, le module d'élasticité, est de l'ordre de 30,228 GPa, 26,229 et 23,475 GPa pour BCg5, BCg7,5 et BCg10, respectivement, tandis que BCm5, BCm7,5 et BCm10, ont enregistré un module d'élasticité de l'ordre de 30,317 GPa, 23,372 GPa et 19,361 GPa, respectivement. La diminution du module d'élasticité par rapport à celui du béton léger de référence, est proportionnelle avec l'augmentation de la teneur en granulats de caoutchouc [Rao15; Moh15a; Moh15b], cette réduction est due aussi à leurs tailles [You12]. La diminution du module d'élasticité indique l'augmentation de la déformabilité des bétons légers caoutchoutés étudiés, ce qui empêche l'initiation des fissures et leur propagation [Agh16 ; Naj12]. Ainsi, les caractéristiques du béton affectent son module d'élasticité; plus leurs modules sont élevés, plus celui du béton est élevé. Etant donné que le module d'élasticité des

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

granulats de caoutchouc est faible, comparativement à celui des granulats naturels, le module d'élasticité du béton sera inférieur par rapport au béton conventionnel [You14].

A l'âge de cinq (05) ans, ce module a augmenté par rapport à celui mesuré à l'âge de 28 jours. Cette augmentation, est d'environ 41,93%, 58,77% et 46,70% pour BCg5, BCg7,5 et BCg10, respectivement, tandis que BCm5, BCm7,5 et BCm10, ont enregistré une augmentation du module d'élasticité de l'ordre de 50,45%, 47,91% et 47,73%, respectivement. Le module d'élasticité du béton léger de référence, est de l'ordre de 37,141 GPa, enregistrant une augmentation d'environ 46,21%.

L'âge avancé du durcissement, a provoqué une augmentation des vitesses d'impulsion du son et des modules d'élasticité des bétons légers ayant de différents teneurs en caoutchouc.

Selon les résultats de cet essai, on peut relier la vitesse d'impulsion ultrasonore à la masse volumique des bétons légers, et ces deux derniers paramètres au module d'élasticité. Ces relations, donnent une base logique pour les utiliser, afin d'obtenir des informations sur les propriétés des composites cimentaires. Les propriétés acoustique des composites cimentaires caoutchoutés, a encore besoin de plus d'enquêtes. Toutefois, on peut noter que l'inclusion des granulats de caoutchouc, dans la matrice permet d'augmenter son absorption acoustique ainsi que son élasticité [Suk09; Moh12; Gis14; Eir14]. Les mesures effectués dans le cadre de cet essai non destructif, ont permis aussi de prouver son efficacité pour prédire l'impact d'une teneur élevée en caoutchouc sur les propriétés des composites résultants.

4.6 Résistance au feu

Le béton étant un matériau hétérogène composé de plusieurs sortes et formes d'agrégats et de l'eau, sa tenue au feu diffère et dépend de la nature de ces derniers, ainsi que de certaines de ses caractéristiques. Elle est dépendante aussi du feu lui-même: vitesse de la montée en température, température maximale atteinte et la durée d'exposition à cette température [Rob08]. Lorsqu'un béton est soumis accidentellement à des températures fortement élevées, les composés hydratés de la pâte de ciment durcie se trouvent déshydratés et déstructurés, ce qui provoque une altération des granulats. Ces transformations dues à l'instabilité thermique provoquée par l'augmentation de la température, modifient le comportement du béton et l'endommagent des zones proches de la surface de l'élément en béton, sont constatés en premier lieu, ensuite l'apparition d'autres problèmes tels que l'écaillage et l'éclatement en dernier lieu.

Le comportement thermique et hydrique du béton, dépend aussi du degré d'humidité et de la quantité d'eau présente dans la matrice cimentaire. Ceci, se traduit sur le plan macroscopique par une modification des propriétés mécaniques, une perte de densité et une évolution de la porosité et la perméabilité. L'écaillage et l'éclatement des bétons peuvent être expliqués par la présence d'une contrainte thermique ou des pressions de vapeur ou bien les deux à la fois. La matrice cimentaire et les granulats subissent généralement, au cours du chauffage des modifications dimensionnelles opposées. Dès que la température dépasse les 105°C, les granulats du béton subissent une expansion, alors que la matrice cimentaire subit un retrait lors du premier chauffage. Ce comportement d'incompatibilité thermique des constituants, suite à la création des contraintes internes causées par le changement de la température [Ven83; Ven84], induit essentiellement des micro-fissures importantes dans le composite [Blu76].

4.6.1 Effets des hautes températures sur la microstructure du béton

Selon la littérature, les domaines dans lesquels la variation de poids (perte ou gain de masse) est régulière, est aux bornes des domaines où on observe des modifications sensibles de perte hydrique du béton. Les auteurs ont fixés presque les mêmes bornes de ces domaines.

Entre 30°C (température ambiante) et 120°C, l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. Si la vitesse de la montée de la température, est lente, à 120°C l'eau libre est complètement éliminée, dans le cas contraire l'évaporation peut se prolonger au-delà de 200°C. De 120°C à 300°C, un accroissement de la perte de poids des bétons est observé. A 180°C la déshydratation du gel de ciment (C-S-H), se produit et se poursuit jusqu'à 300°C ou le taux de séchage passe par un maximum correspondant à la fin de la migration de l'eau évaporable [Nou94 ; Gaw04], l'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.

De 300°C à 600°C, la déshydratation du béton ralentie. C'est autour de 450°C et 550°C que la porthlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) se déshydrate [Nou94; Kho92]. Dans la plage de température de 600°C à 700°C, l'eau chimiquement liée continue à s'évacuer, le C-S-H se décompose, c'est donc la seconde étape de la déshydratation des hydrates de calcium. De 700°C à 900°C, s'il y a des granulats de calcaires, ils se décomposent. La fusion de la pâte et des agrégats s'amorce à partir de 1100°C.

4.6.2 Evolution de la porosité et la perméabilité

Le type de la porosité du béton affecte fortement les propriétés mécaniques de ce dernier, ainsi, la connaissance de la manière dont les pores sont distribués est une information importante. Il a été démontré par plusieurs auteurs, qu'à un chauffage de l'ordre de 600°C, le volume d'un béton ordinaire y compris celui des pores qu'il contient augmentent. Cela est dû, à la détérioration des cloisons capillaires par l'évaporation de l'eau et la micro-fissuration provoquée par la dilatation différentielle de la matrice cimentaire et des granulats [Nou95].

Bazant lui aussi, a travaillé sur la pression des pores et leur évolution durant le chauffage et il a signalé que la perméabilité du béton subit un accroissement significatif quand la température dépasse 100°C [Baz78; Baz79]. Ce phénomène, peut être expliqué par le fait que le transfert d'humidité pour les températures ambiantes, est contrôlé par de très minces tuyaux, permettant l'évacuation de l'eau dans son état adsorbé et empêchant le passage de l'eau à l'état liquide ou vapeur. En effet, après 100°C, la perméabilité subit une augmentation liée à l'accroissement des dimensions de ces tuyaux pendant le chauffage, due probablement à la disparition des cloisons capillaires sous l'effet de la pression des pores.

4.6.3 Perte de masse

La perte de masse des bétons, subissant de fortes températures, est une donnée importante de l'étude de leur durabilité à de fortes conditions thermiques, elle est obtenue en suivant les changements des poids des matériaux, pendant les cycles du chauffage. Lorsque le béton est sollicité par de hautes températures, il perd de sa masse (figure 4.23) quand l'eau libre contenue dans les capillaires disparaît et l'eau liée contenue dans les hydrates s'évapore et s'échappe par les pores.

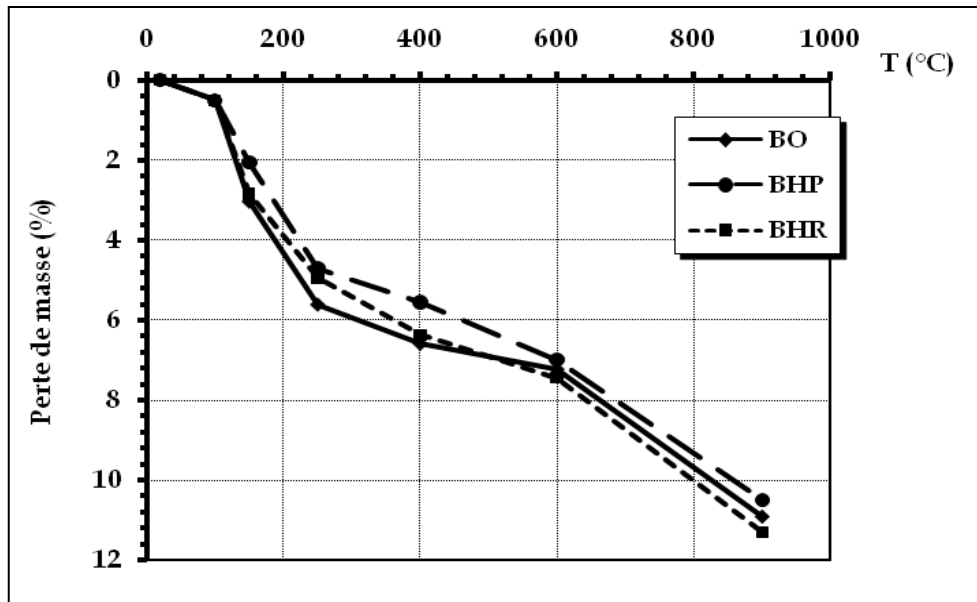


Figure 4.23 Evolution de la perte de masse avec la température [Hac14].

La sollicitation thermique des bétons peut être suivant deux différents régimes; dont les mesures de pertes de masse sont différentes aussi. Lors du premier régime dit permanent (en fixant la température des cycles de chauffage), la température au sein de l'enceinte chauffante, est fixée dès le départ et n'évolue pas au cours du chauffage. Durant ce type d'essai, le béton perd très rapidement en premier lieu l'eau contenue dans les capillaires, puis la perte de masse ralentit et on atteint petit à petit un seuil limite de déshydratation en dernier lieu. La température seuil appliquée au cours de ce type d'essai, est de 105°C et correspond à la limite conventionnelle de départ de l'eau libre contenue dans les matériaux [Gaw04].

Lors du deuxième régime dit transitoire (en fixant la vitesse de chauffage des cycles thermiques), une montée en température est réalisée; de la température ambiante à la température ciblée. La perte de masse mesurée sur un béton durant le chauffage, permet de renseigner sur la cinétique de perte de masse en fonction de la température. Cette information, permet à la fois de connaître la quantité de matière globale perdue par le matériau, et la façon dont cette dernière est perdue au cours du chauffage [Hac14].

4.6.4 Essai au feu (ASTM E2032-09)

La prise en compte réglementaire du risque d'instabilité thermique des bétons, repose essentiellement sur des approches expérimentales [Fer06]. Ces derniers, ont toujours montré que le comportement au feu du béton dépend des proportions des composants utilisés, et est déterminée par complexes transformations physico-chimiques se produisant lorsque le matériau se réchauffe [Kho00]. Dans les études de recherche trouvées dans la littérature, les résultats des essais ont montré que le type du composite cimentaire, le remplacement des granulats ou du ciment, la durée de durcissement, la température maximale, le temps d'exposition et le type de refroidissement, sont les principaux facteurs qui décident de la tenue et les propriétés de ces composites après chauffage. Le but de l'essai au feu est de tester le comportement des composites cimentaires caoutchoutés à des hautes températures.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

4.6.4.1 Tenue du caoutchouc au feu

La nature hydrophobe des granulats de caoutchouc repousse l'eau, ceci explique pourquoi il ne se mélange pas pendant le malaxage. Au même titre que le liège et le feutre, le caoutchouc est un des matériaux les plus utilisés pour l'isolation vibratoire. Par ailleurs, sa conductivité thermique est relativement faible (la conductivité thermique du caoutchouc vulcanisé est du même ordre que celle de la terre crue, soit 0,3 à 0,4 W/m.°C). Ceci explique aisément la tentation d'évaluer l'effet des granulats de caoutchouc sur la conductivité thermique et sur le coefficient d'absorption acoustique du béton incorporant ces granulats. S'agissant des composites cimentaires destinées pour les grandes surfaces où les incendies sont faiblement probables, leur résistance et performance au feu dans cette application n'ont pas encore été prouvées.

Le caoutchouc est peu sensible à la chaleur, car les liaisons intra- et intermoléculaires, qui assurent la cohésion des matières plastiques, se brisent facilement quand la température augmente. Après le chauffage, on obtient une matière plastique molle, qui devient de plus en plus fluide. La température élevée des incendies de pneumatiques provoque la rupture partielle de la gomme en une matière huileuse [Moh15a].

Avant de soumettre les bétons légers caoutchoutés aux essais thermiques, il est préférable d'étudier l'effet direct des températures élevées sur les granulats de caoutchouc. Quatre échantillons secs de 50g (figure 4.24) de granulats de caoutchouc, ont été soumis à cet essai à différentes températures de chauffage 40, 60, 100, 200 et 300°C, pendant 24 heures et un refroidissement pendant une demi-heure (30 minutes).

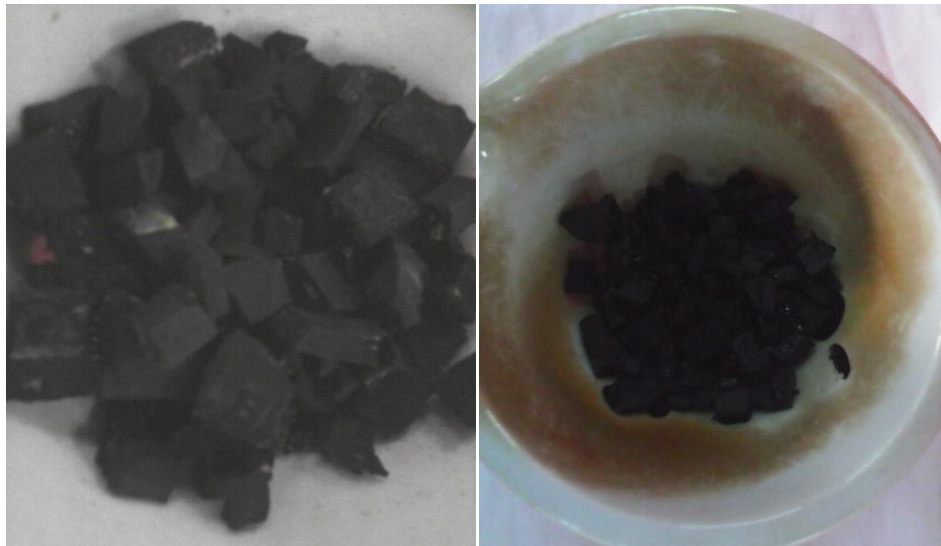


Figure 4.24 Granulats de caoutchouc avant et après leurs mises au four à 40, 60, 100, 200 et 300 C°.

Le but de ce teste, est de suivre les changements massiques de ces granulats, sous effet thermiques. Les résultats illustrés sur la figure ci-dessous (Figure 4.25) représentent la moyenne de quatre résultats.

Aux températures 40 et 60°C, le caoutchouc n'enregistre aucune modification physique signifiante, le changement en poids est de l'ordre de 0,4 à 1.01%. A 100°C, les échantillons sont collants aux mains et l'odeur des granulats de caoutchouc brulés commence à être dégagées, une moyenne de pertes de masse d'environ 2,66% a été constatée.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

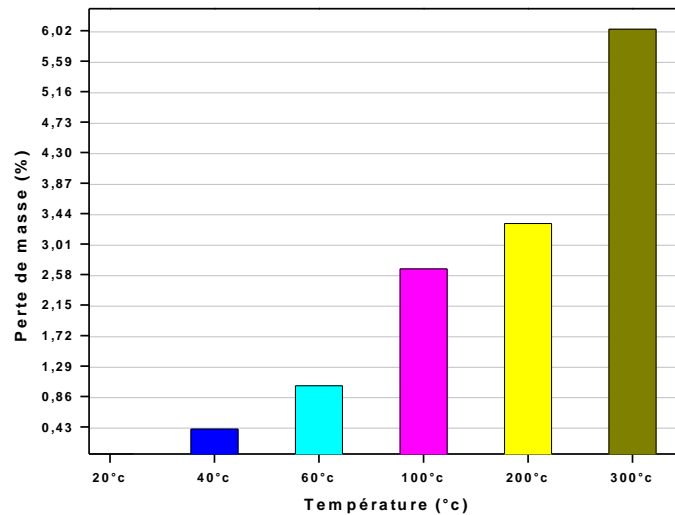


Figure 4.25 Changement massique des granulats de caoutchouc après chauffage [Med17].

A 200°C, les granulats sont brûlés, le feu a activé la désorption des liaisons inter-moléculaires de cette matière en la déformant et la rendant malléables. A 300°C, ils ont pris feu et ont brûlés avec la formation d'une matière huileuse. On constate donc, de légères pertes de masse de l'ordre de 6,04% en moyenne. Ces modifications qui s'accroissent à cette température, ne sont pas significatives par rapport au chauffage effectué et à sa durée, il semble que le caoutchouc résiste au feu plus que certains matériaux vu la température à laquelle il a initialement enflammé (environ 300°C). A température élevée, la rigidité du caoutchouc s'effondre, il se dilate et se comporte comme un liquide visqueux, lorsqu'on le refroidit il reprend sa rigidité.

4.6.4.2 Dispositif de mesure

Pour soumettre les bétons légers aux essais du feu, un four électrique (Four à Moufle M 110) avec thermostat pouvant atteindre une température maximale de 1100°C a été utilisé. Ce four pourrait atteindre un système de chauffage à haute vitesse assez semblable à un feu à de réelles conditions. Les dimensions de l'espace de chargement sont de 520 mm, 520 mm et 300 mm, la carrosserie est prévue tôle d'acier galvanisée, l'isolation est en panneaux de silicate de calcium, pour protéger l'utilisateur du risque d'explosion des spécimens testés. Une balance à une précision de 0,01 g, est utilisée pour la détermination de la masse des éprouvettes avant et après les différents cycles de chauffage.

4.6.4.3 Déroulement des mesures (ASTM E 2032-09)

Afin de suivre le comportement des éprouvettes de bétons légers caoutchoutés sous l'effet de la haute température, cinq (05) cycles de chauffage-refroidissement ont été réalisés à de différentes températures : 200, 400, 600, 800 et 1000°C dans un four. Une montée de température de chauffage de l'ordre de 200°C/24 heures, est appliquée jusqu'à accomplir les cycles prévus pour l'essai. La durée du palier de stabilisation de chaque température, est une (01) heure. Le refroidissement consiste à une descente de température jusqu'à température ambiante.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

Donc les éprouvettes sont mises dans des bacs remplis d'eau pour atténuer l'effet de leur exposition à l'air libre sur les résultats de l'essai. Après cette cure, elles sont essuyées et pesées, ensuite étuvées jusqu'à la stabilisation de leurs poids et enfin soumit à l'essai. La perte de masse, mesurée à la fin du chauffage est déterminée par différence entre la masse avant chauffage et la masse après chauffage. La masse après chauffage est mesurée immédiatement après le refroidissement, de manière à éviter toute réhydratation lors de la conservation à l'air libre.

$$\Delta m = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100 \quad (\%) \quad (4.5)$$

M_i : Masse initiale d'échantillon avant sa mise au feu.

M_f : Masse d'échantillon après sa mise au feu.

Cette perte de masse, permet de quantifier de façon globale, la quantité de matière perdue au cours des cycles de chauffage-refroidissement. A la fin de chaque cycle, des constatations visuelles sont faites afin d'identifier les endommagements produit par le feu.

4.6.4.4 Résultats et interprétations

Différentes études expérimentales réalisées par plusieurs chercheurs ont permis de mieux comprendre le comportement du matériau soumis à des hautes températures ainsi que l'influence de différents paramètres [Hag04 ; Kan07]. De nombreux facteurs contrôlent la réponse du béton au feu. Elle dépend des propriétés initiales des constituants, de leurs compositions et leurs tailles, de la perméabilité du béton du taux d'élévation de température, de la température maximale et le temps de leur exposition au à la température élevée. Ces facteurs, sont importants parce qu'ils gouvernent le développement de pressions internes.

A cet effet, et a fin de limiter les effets dus à l'instabilité thermique des bétons légers caoutchoutés en particulier, il est indispensable de connaitre au mieux le processus de leur endommagement sous l'effet thermique.

Les recherches au sujet du comportement des bétons contenant des granulats de caoutchouc au feu, sont rares et peu concluantes. Il n'y a que quelques auteurs qui ont laissé leurs traces dans. L'état des éprouvettes avant leurs mises au feu est présentée par la figure 4.26.

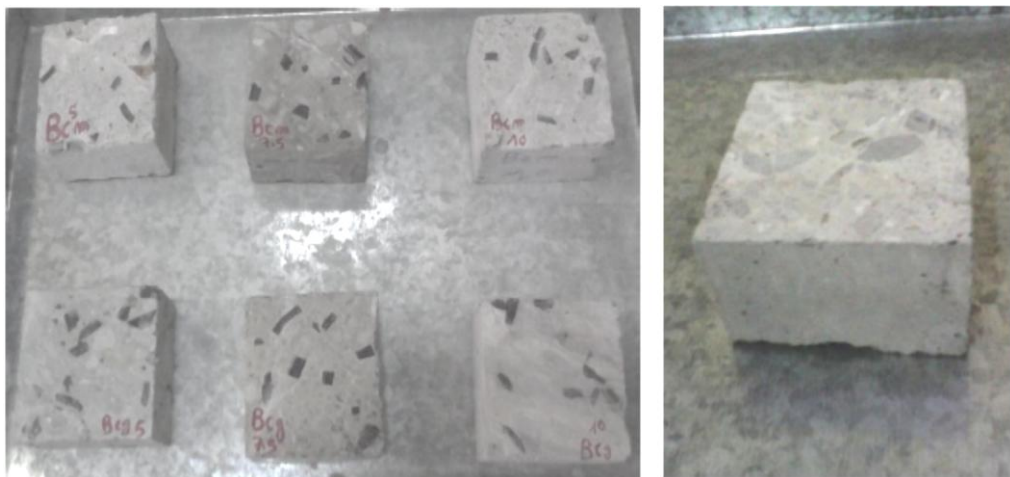


Figure 4.26 Eprouvettes de bétons légers caoutchoutés et de référence avant leurs mises au feu.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

La dégradation des éprouvettes de bétons légers caoutchoutés chauffés de la température ambiante jusqu'au 1000°C, a été surveillée en observant les changements massiques. Les résultats des pertes de masse en fonction de la température, ont été rassemblés sur la figure 4.27. Ce qui est observé sur la figure, illustrant les différents domaines de chauffage des bétons légers caoutchoutés, est qu'à une température de 200°C, les différents bétons légers testés, ont subi des pertes de masse entre 1% et 3%.

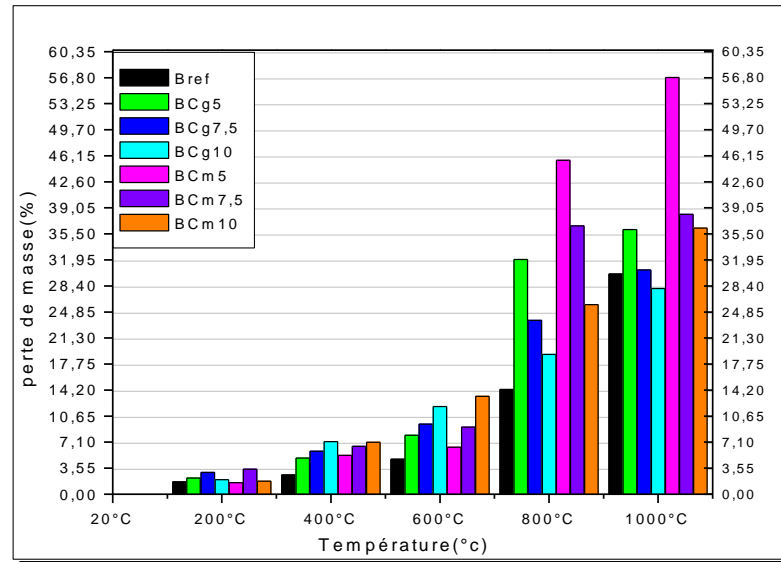


Figure 4.27 Evolution des pertes de masse au feu des bétons légers testés [Med17].

Selon la littérature, c'est au-dessus de 100°C, que l'eau retenue par capillarité libre à l'intérieur du béton commence à s'évaporer [Net11]. A 170°C, le caoutchouc commence à fondre, fournissant un espace à l'eau évaporée dans le béton pour s'échapper, ce qui réduit de manière significative la pression interstitielle induite par la vapeur d'eau, une des principales raisons conduisant à la fissuration du béton sous haute température plus élevée [Net11]. La présence des granulats de caoutchouc, a permis de retarder le développement de ces fissures sous l'effet de hautes températures.

A 200°C, les bétons légers caoutchoutés ne montrent aucune perte significative de leurs masses avec un maximum de 3,41%, alors que pour le béton léger de référence, elle ne dépasse pas 1,70%, ceci est dû essentiellement, à la quantité d'eau évaporée et disparue, indiquant la décomposition des gels de C-S-H. Une odeur légère de caoutchouc brûlé a été ressentie à cette température. Les bétons de référence et ceux contenant des granulats de caoutchouc, n'ont pas montré des fissures visibles à cette température, comme on le voit dans la figure 4.28, sauf dans le cas du spécimen BCg7,5 dont une fissure assez fine a été observé sur la surface où il y avait un granulats de caoutchouc.

En général c'est au-dessus de 300°C que la déshydratation complète de la matrice cimentaire se produit, ce qui conduit à l'apparition de fissures superficielles.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.



Figure 4.28 Epreuve de bétons légers caoutchoutés et béton léger de référence chauffés à 200°C.

A 400°C, la perte de masse devient un peu plus significative, elles sont presque les mêmes pour les éprouvettes BCg10 et BCm10 d'environ 7,1% de leurs masses, alors que le béton de référence a perdu 2,6% de sa masse (figure 4.27). On constate l'apparition des fissures aux surfaces des éprouvettes (figure 4.29) des deux compositions contenant 5% de caoutchouc, elles sont plus apparentes aux éprouvettes: BCm5, BCm7,5 et BCm10 (fissures plus ou moins profondes). Ces fissures, sont provoquées par l'accumulation des pressions internes et la disparition des joints de dilatation dans les bétons légers mis au feu entraîne des déformations dans leurs différentes parties chauffées.

Il a eu lieu d'une dilatation différentielle dans les bétons légers caoutchoutés car les coefficients de dilatation thermique de ces composants sont très différents, celui de la matrice cimentaire est de l'ordre de $7,4 \times 10^{-6}$ à $13 / ^\circ\text{C}$ [Mid03], alors que tous les élastomères utilisés dans la production des pneumatiques, ont des coefficients de dilatation thermique de l'ordre de $10^{-4} / ^\circ\text{C}$, et le noir de carbone et la silice utilisée dans les compositions de caoutchouc ont des coefficients de dilatation thermique de l'ordre de $10^{-5} / ^\circ\text{C}$ et $6,10 / ^\circ\text{C}$ [Ago08]. La plupart des agrégats ont un coefficient de dilatation thermique entre 4 et $13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ [Mid03]. Donc, il y a une grande différence entre la dilatation thermique de la pâte de ciment et celle du caoutchouc. Ceci, explique nos constatations relatives au départ des fissures à partir des granulats de caoutchouc.

A 600°C, la perte de masse augmente légèrement. Le BCm5 a perdu 6,42% de sa masse initiale, représentant ainsi la perte minimum dans ce cycle de chauffage. A ce cycle de chauffage aussi, BCg10 et BCm10 ont présenté les pertes les plus importantes, elles sont de l'ordre de 11,96 et 13,34% respectivement. BCg7,5 et BCm7,5 eux aussi ont subi des pertes de masse semblables d'environ 9,55 et 9,16% respectivement. Les dégradations observées sur les éprouvettes commencent à être importantes à ce stade (figure 4.30), suite à la modification de la structure du béton,

L'augmentation de la porosité, l'apparition de micro et macro-fissures avec la décomposition du granulat à des températures supérieure à 550°C [Gaw04].

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

Le béton léger de référence a perdu 4,80% de sa masse initiale. Sur le plan visuel, des zones des éprouvettes des bétons légers caoutchoutés exposés à 600°C, ont pris en quelque sorte la couleur jaunâtre, rougeâtre avec des zones gris clair, avec l'apparition des fissures, généralement leurs départ se fait du coté des arrêtes.

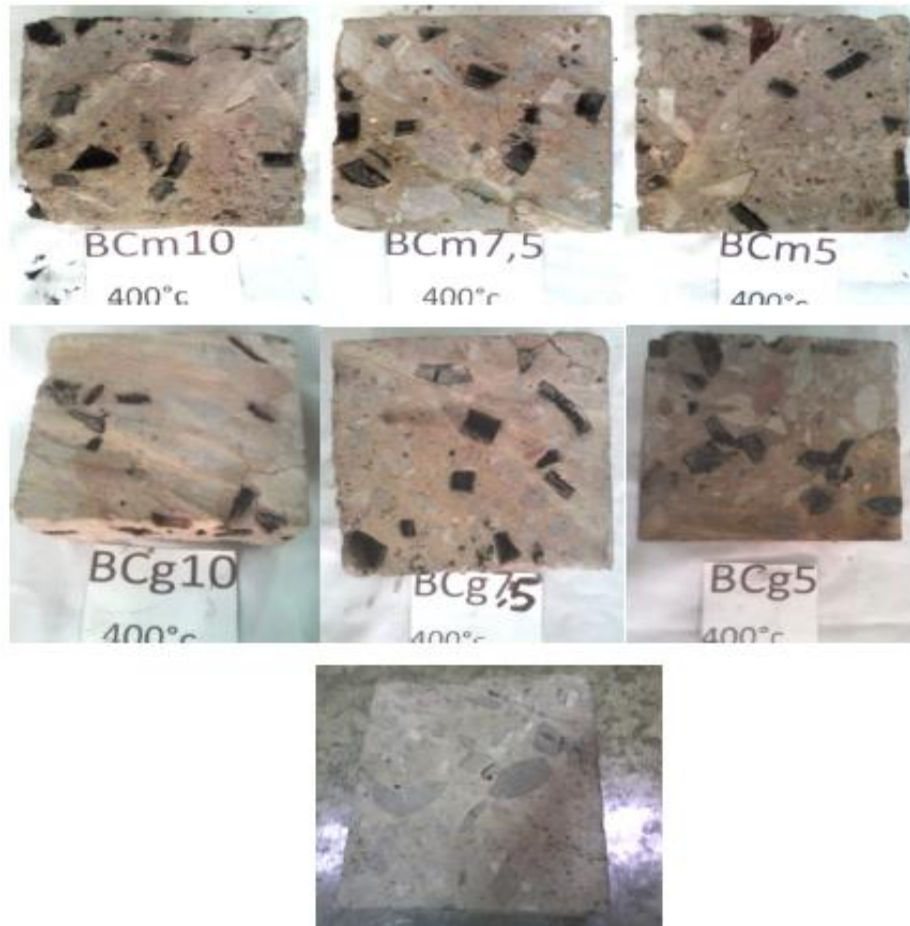


Figure 4.29 Eprouvettes de bétons légers caoutchoutés et béton léger de référence chauffés à 400°C.

Dans les toutes premières heures de ce cycle de chauffage les granulats de caoutchouc apparents, ont commencé à brûler puis disparaître en laissant des trous. Ce résultat, est en accord avec les recherches de Hernández-Olivares et Barluenga, selon ces auteurs, ces trous produits servent de vases de décompression à la vapeur d'eau interne permettant par conséquent la diminution de la contrainte due à la pression de vapeur. Ils ont noté aussi, qu'à même profondeur à l'intérieur des éprouvettes la température est plus faible si on augmente le dosage des granulats de caoutchouc [Her04]. La perte de masse enregistrée dans les bétons légers, est surtout une perte de granulats de caoutchouc qui ont disparus de la matrice cimentaire. Cette dernière, est plus saine que celle de béton de référence représentant en plus des pores, un réseau de fissures dense.

Les composites cimentaires à une forte teneur en caoutchouc répondent au feu en un temps rapide (le cas de BCg10 et BCm10 de cette étude) et ont un fort dégagement de la chaleur produisant de la fumée.

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

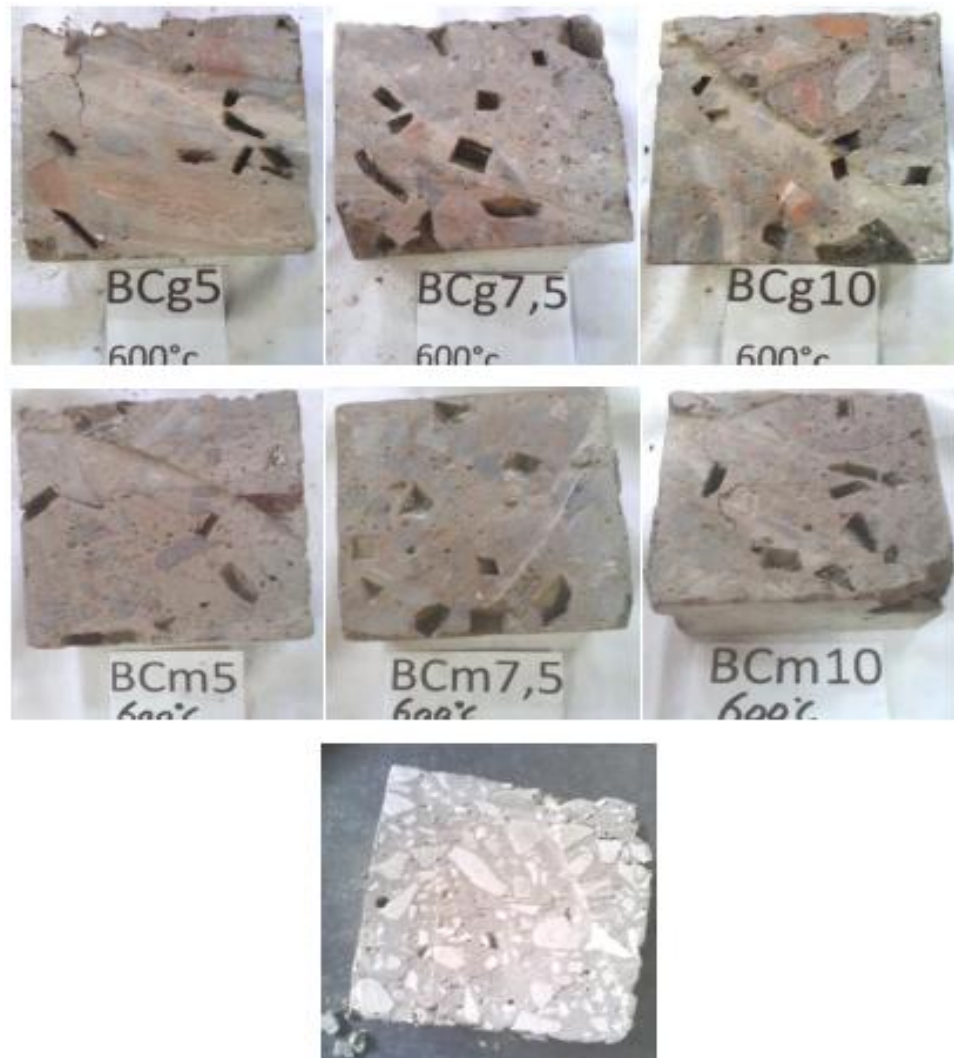


Figure 4.30 Epreuve de bétons légers caoutchoutés et béton léger de référence chauffés à 600°C

A 800°C, la perte de masse a évolué de façon significative pour l'ensemble des bétons légers, en particulier, ceux de la composition (BCm) qui ont enregistré un maximum de perte de masse. L'augmentation de ces pertes a été proportionnelle à la diminution de la teneur en caoutchouc, pour les deux compositions (BCm et BCg). Le BCm5 a perdu 45,59% de sa masse alors que BCm10 a perdu 25,85%, pour BCg5 et BCg10, cette perte a été de l'ordre de 32% et 19,08% respectivement. Les fissures précédemment constatées, se connectent entre eux et deviennent plus profondes, la majorité des éclats des éprouvettes se produit à leur bords, le béton de référence a perdu 14,28%, mais visuellement, il est trop fragile montrant un état de fissuration avancée (figure 4.31).

Ceci est due à la déshydratation de la matrice cimentaire, l'eau se transforme en vapeur, cette dernière migre vers les régions sèches et froides du matériau où elle se condense et induit une augmentation de pression, qui en suite provoque l'éclatement du béton [And97]. Ainsi, l'accumulation de cette eau dans la zone la plus faible, celle qui exist entre le granulat et la pate de ciment, crée une zone poreuse dans laquelle l'éclatement sera initié.

A 1000°C, le dernier cycle de chauffage-refroidissement, les pertes de masse sont considérables. Les bétons légers caoutchoutés, ont subit des éclatements et des écaillages remarquables (figure 4.32). Le BCm5 a enregistré une importante perte de masse d'environ 56,82%, suivi par BCm7.5 et BCm10. Les bétons légers de la

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

composition (BCg), ont perdu aussi une quantité importante de leurs masses, cette quantité change inversement avec la teneur en caoutchouc. A la fin de cette exposition, cette composition a enregistré des pertes de masse semblables à celles enregistrées dans le cas du béton de référence (30%). Ce dernier a perdu 32% de sa masse initiale, il a été, difficilement pesé, effrité et atteint par des fissures profondes, à de secousse moyennement forte ils s'effondrent.

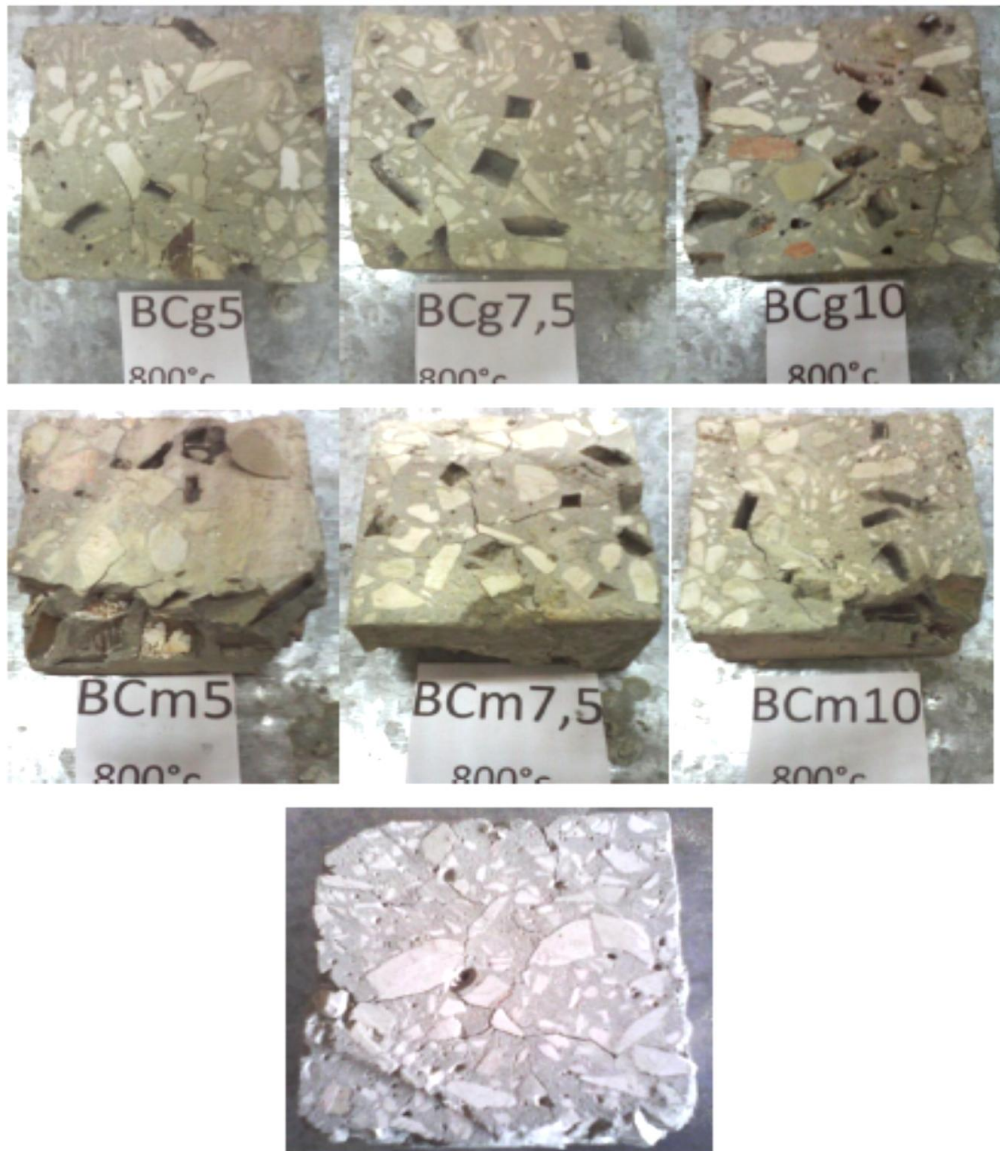


Figure 4.31 Epreuve de bétons légers caoutchoutés et béton léger de référence chauffés à 800°C

L'éclatement est le résultat du processus chimiques, thermiques, hydriques et mécaniques couplés par le biais des caractéristiques microstructurales, ces dernières évoluent au cours de la sollicitation thermique [Con98]. Aussi, l'augmentation de la température maximale et sa montée, ainsi que la taille et la forme les éléments conditionnant la distribution de la chaleur et des eaux, sont responsables de l'éclatement. Les écaillages produits dans les bétons légers caoutchoutés sont provoqués sous l'effet des pressions proches des surfaces chauffées, créés par la migration de l'eau de la zone humide existante en profondeur vers la zone sèche à la surface des éléments chauffés, cette hypothèse a été avancée par Anderberg [And97].

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

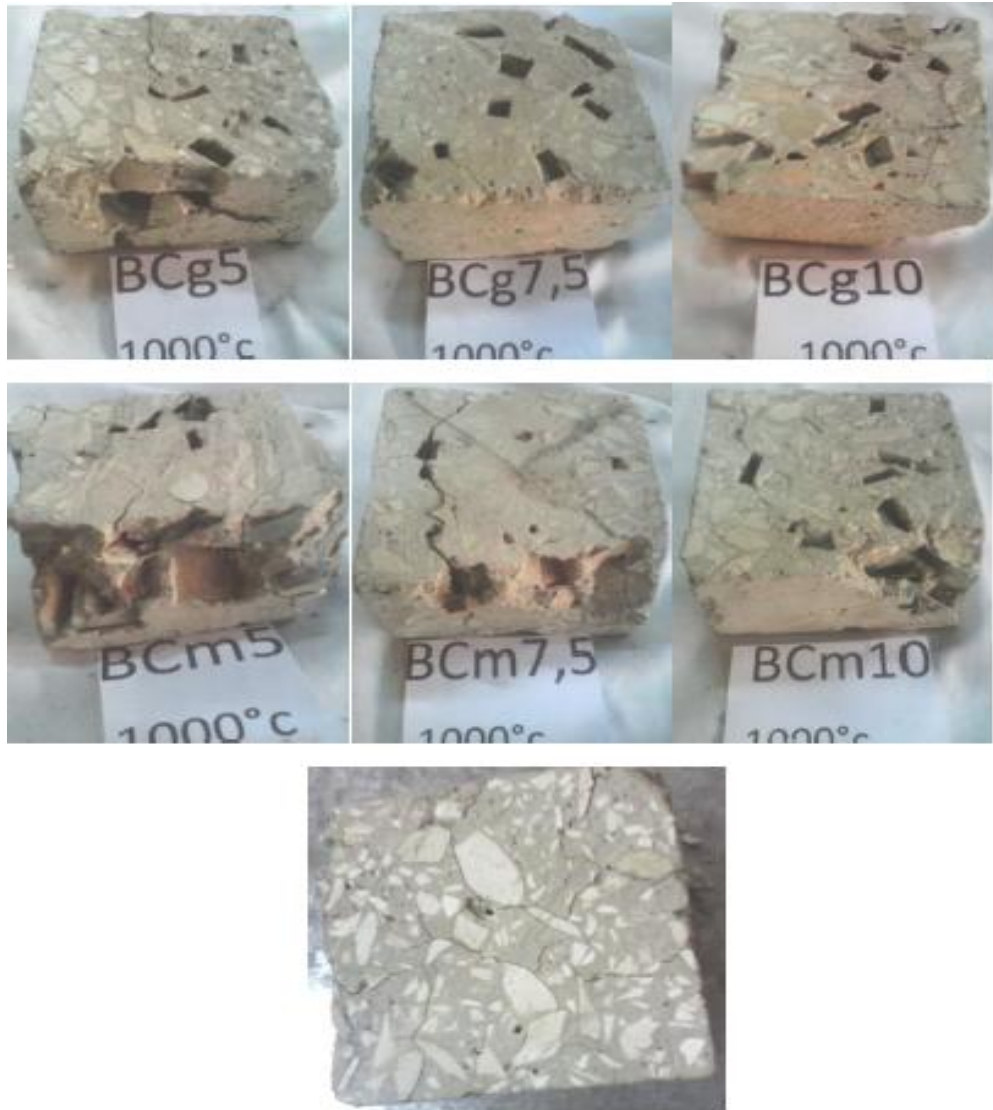


Figure 4.32 Epreuves de bétons légers caoutchoutés et béton léger de référence chauffés à 1000°C [Med17].

Si on se réfère à l'état final des éprouvettes testées par les cinq (05) cycles de chauffage-refroidissement (200, 400, 600, 800 et 1000°C), on conclue qu'à un ajout mixte de granulats de caoutchouc (grossier et fin), à un taux de l'ordre de 5% (BCm5), la perte de masse est plus importante par rapport à un ajout de 10% (BCg10) de caoutchouc par substitution du gravier seul. A la fin du chauffage, les éprouvettes BCm5, BCm7,5 et BCm10 ont perdu environ 60, 38 et 36%, respectivement, de leurs masses initiales, alors que les éprouvettes BCg5, BCg7,5 et BCg10, ont perdu 36, 30 et 28%, respectivement. La perte de masse a augmenté avec la diminution de la teneur en caoutchouc. Le béton léger de référence, a perdu 30% de son poids, mais il a atteint un stade d'instabilité due au feu, plus avancé que ceux caoutchoutés.

La tenu au feu des composites testés a été proportionnelle aussi, à la distribution des granulats de caoutchouc et leurs contacts au feu, même observation a été faite par Cuong, citant le travail expérimental qu'a fait Fattuhi et al. [Fat96]. Ces derniers, ont vérifié le risque de l'inflammabilité des granulats de caoutchouc incorporés dans le composite à base cimentaire. Ils ont soumis des cubes de bétons à un feu à l'aide d'un chalumeau durant trois (03) minutes. Ils ont relevé, que les granulats de caoutchouc se trouvant à la surface des cubes ont brûlé et que tous

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

les feus s'éteignent au bout de 4 à 5 secondes dès que l'on écarte le chalumeau. A la fin, il a été conclue que l'inflammabilité des granulats de caoutchouc est réduite par leur enrobage dans le béton [HO10]. Fattuhi et al., ont constaté, que lorsque les granulats sont enrobées par un liant, ce dernier peut contrôler l'inflammabilité du composite résultant, si le liant a un point d'éclair inférieur à celui des granulats de caoutchouc (582°C), ils peuvent être utilisés pour améliorer leurs résistance au feu [Fat96].

Les résultats montrent que la température élevée, accélère la propagation des fissures formés dans la matrice cimentaire. Au cours de la dilatation-rétrécissement de ces différentes phases, produisant ainsi l'expansion volumétrique produite et de l'air piégé dans les vides, mènent aux craquages et aux ruines. Malgré que la présence des granulats de caoutchouc réduit ceci ; le béton caoutchouté n'est pas approprié pour des applications à hautes températures au delà de 600°C, en raison de sa sensibilité au feu et de la combustibilité des granulats de caoutchouc.

Donc, l'évaluation de la perte de masse des spécimens de cette étude, est un fort indice de leur comportement au feu, permettant de conclure que le matériau étudié peut résister à des températures élevées sans mettre en danger les vies humaines. Mais il est également nécessaire d'évaluer ses performances mécaniques résiduelles, quant à son utilisation après une exposition à des températures élevées. [Jos12].

Les essais au feu réalisés par Topçu et al., ont indiqué que la inflammabilité du caoutchouc dans un composite cimentaire a diminué significativement par la présence du ciment et des granulats, malgré que ces composites ont montré une résistance au feu satisfaisante, ils ont besoin d'être testés plus pour confirmer ceci.

4.7 Absorption d'eau

Un béton imperméable à l'eau n'existe pas, car au fil du temps et en présence continue ou pas de l'eau, rien ne peut être complètement imperméable. Ceci, est due à sa structure plus aux moins poreuse, qui dominent ses résistances mécaniques et sa durabilité en conséquence. En effet, la fabrication d'un béton à faible porosité est un moyen fournissant un mécanisme de protection contre la pénétration de tous les agents agressifs et l'eau en premier lieu. Le rôle de l'eau dans le processus de détérioration des matériaux de construction poreux, a été identifié depuis longtemps, il est susceptible de provoquer des désordres importants sur les ouvrages exigeant dans leurs constructions des matériaux résistants à l'eau, tels que les ouvrages hydrauliques ou enterrés ou ceux construits en milieu humide, ainsi que les dallages et les chaussées qui sont soumise aux influences atmosphériques particulièrement importantes. Donc, l'absorption d'eau la propriété la plus importante du béton, est liée à sa durabilité.

La quantité d'eau incorporée pour la fabrication d'un béton, est un facteur déterminant l'évolution de sa structure aux différentes échelles, elle ne doit pas être en excès après l'hydratation de ses différentes phases. Ceci, affecte ses caractéristiques, en créant dans le béton un réseau capillaire qui est d'autant plus important que le ciment est broyé grossièrement et/ou la compacité du mélange est faible, suite à l'adoption d'une mauvaise proportion des constituants, tel que l'emploi de sables fins ou tout autre ajout. Cette dernière, est aussi directement dépendante de la qualité de la protection du béton frais contre l'évaporation après sa mise en œuvre.

L'absorption d'eau des composites cimentaires doit être l'objet de contrôle efficace, en particulier ceux contenant de nouveaux matériaux, tels que le caoutchouc, afin de prévoir leurs comportements à long terme. Le

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

caoutchouc a de nombreuses propriétés telles que sa densité, l'absorption d'humidité, l'isolation thermique et acoustique, qui sont des facteurs qui ont fait de lui un bon matériau pour l'étanchéité du béton. Conformément à cela, les chercheurs se sont concentré pour trouver des nouvelles formulations contenant des granulats de caoutchouc, permettant de réduire l'absorption d'eau. Dans cette partie, l'absorption d'eau des bétons légers a été étudiée.

4.7.1 Essai d'absorption de l'eau

En réponse à l'idée que les propriétés d'absorption d'eau, fournissent des données les plus utiles concernant la durabilité des structures en béton, les auteurs se sont motivés sur l'étude des caractéristiques des composites cimentaires à travers ce paramètre. Différents tests, ont été développés pour étudier les propriétés d'absorption d'eau, par mesure du taux d'absorption d'eau par succion capillaire à l'intérieur d'une éprouvette ou par immersion, permettant d'avoir les résultats les plus fiables. L'absorption d'eau est quantifiée par immersion et est effectuée sur sept (07) éprouvettes ayant un volume d'environ 500 cm³ (figure 4.33), conservées à l'air libre, résultantes d'un sciage d'éprouvettes prismatiques de la même provenance des éprouvettes précédemment présentées.

L'absorption se mesure à une température de 20 à 25°C, avant le test d'immersion dans l'eau, les éprouvettes de béton léger sont séchées jusqu'au poids constant dans un four à une température de 105 ± 5°C, pendant au moins 24 heures, elles sont enlevées du four, refroidis et pesées (poids de contrôle noté A). Les éprouvettes, sont immergées pendant au moins 48 heures et essuyées de manière à se débarrasser des eaux de leurs surfaces ensuite pesées, jusqu'à ce que des mesures successives des masses des éprouvettes montrent une augmentation de 0,5% de la dernière pesée, ce poids est noté B. Dans le cas contraire, où elles sont utilisées humides avant leur immersion, elles seront mises au four et pesées chaque 24 heures jusqu'au poids constant, dans ce cas la durée peut néanmoins se limiter au temps nécessaire jusqu'à une masse constante deux fois successive (intervalle de 24 heures).



Figure 4.33 Des éprouvettes de bétons légers immergées dans l'eau.

Donc l'absorption d'eau est déterminée par immersion (figure 4.33) des éprouvettes des bétons légers dans l'eau, des mesures de l'augmentation de leurs masses par rapport à leurs masses sèches (équation 4.6)

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

$$\text{Abs} = \frac{B-A}{A} \times 100 (\%) \quad (4.6)$$

Abs : Absorption d'eau (%)

A : Masse humide après immersion.

B : Masse sèche après séchage.

4.7.2 Interprétation des résultats :

L'absorption d'eau du béton sec, est dépendante de la vitesse d'absorption et de la porosité effective du béton. Les résultats représentés sur la figure 4.36, indiquent que les masses des éprouvettes, ont légèrement augmenté. Les bétons légers caoutchoutés, ont montré un maximum d'absorption de l'ordre de 5,13%, correspondant au BCg10. Alors que, BCg5 et BCg7,5 ont présenté les taux d'absorption les plus élevés, qui sont de l'ordre de 4,84 et 4,81%, respectivement. Un taux d'absorption de l'ordre de 4,61%, est enregistré pour BCM5, BCM7,5 a enregistré 4,35% , alors que BCM10 a enregistré 4,86%. Le béton léger de référence a absorbé environ 5,09% de son poids initial.

L'utilisation des granulats de caoutchouc à faibles taux, produit une absorption d'eau réduite. A un taux de l'ordre de (5 à 7,5%) l'absorption d'eau a diminué, ceci est le résultat de la teneur en air introduite dans ces bétons légers, causée par la nature de ces granulats piégeant cet air par leur surfaces rugueuses ce qui les rend moyennement perméable [Suk12].

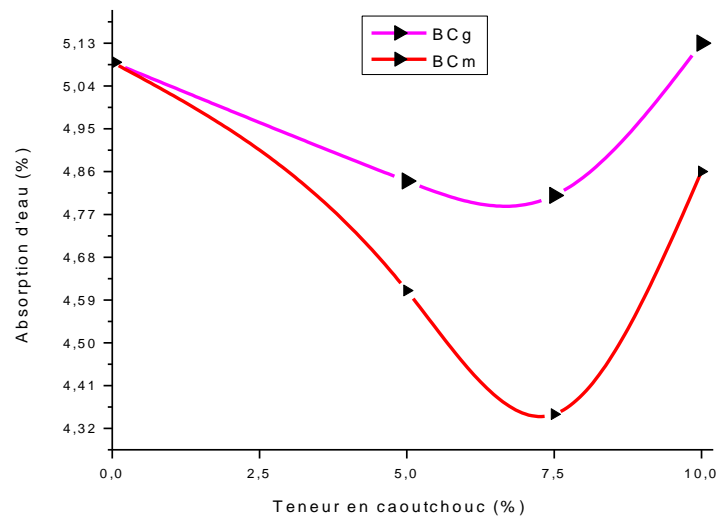


Figure 4.34 Absorption d'eau des bétons légers étudiés [Med17]

En outre, Benazzouk et al., ont étudié le comportement hydraulique de bétons incorporant des particules fines de caoutchouc en remplacement partiel du ciment, et ont conclu que la propagation de l'eau a été limitée, afin de développer des matériaux de construction légers et afin de fournir une meilleure protection à l'armature d'acier contre la corrosion et à la pénétration des ions chlorure [Ben07]. Khaloo et al., ont trouvé dans leur recherche, que les granulats de caoutchouc, agissent comme des pores et qu'ils ont un taux d'absorption de l'ordre de 0% [Kha08]. Ce

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

sont les gros pores qui sont remplis d'eau ensuite les petits pores [Nag14]. L'augmentation de la teneur en granulats de caoutchouc au-delà de 7,5%, en remplacement des granulats fins ou gros ou les deux à la fois, permet d'avoir une absorption plus importante. Leur présence favorise la formation des vides susceptible à favoriser la pénétration des eaux.

L'absorption d'eau de la composition (BCm) est moins importante. L'utilisation des granulats de caoutchouc avec une variété de tailles, a réduit la porosité et l'absorption des bétons légers caoutchoutés. Su et al., ont observé que ce type de substitution rend les composites cimentaire plus compacte, les granulats de caoutchouc fins remplis les pores produit par les gros granulats, la perméabilité est, par conséquent, réduite [Su15].

D'après la différence du taux d'absorption d'eau correspondants aux BCg7,5 et BCm7,5, on peut dire que la perméabilité à l'eau dans ces deux, est régit par la distribution des granulats de caoutchouc après leurs durcissement. Elle est non uniforme de telle sorte que ceci ne peut juger la perméabilité des deux composites. Ce comportement, est considérée comme étant aléatoire suite à l'hétérogénéité des mélanges caoutchoutés, on peut le considéré taux seuil de remplacement des granulas naturels pour avoir un béton léger avec absorption d'eau réduite le maximum. Donc, toute autre enquête sur l'emploi des granulats de caoutchouc, peut varier avec les changements dans les caractéristiques des matériaux, telles que les proportions utilisées et les procédures de durcissement.

Une augmentation progressive de ce paramètre, est observée avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. La porosité est affectée par leurs présences, ce qui a été confirmé dans la recherche d'Onuaguluchi et Panesar, qui ont constaté une augmentation de la porosité et l'absorption d'eau dans les bétons caoutchoutés [Onu14].

Selon la même figure (4.34), les bétons légers de la composition (BCg), sont les plus atteints par l'eau, à 10% d'emploi de ces granulats, l'absorption d'eau est supérieure à celle du béton de référence, alors que Gesoglu et al., ont confirmé que la perméabilité des mélanges contenant de gros granulats de caoutchouc est moins importante que ceux contenant de granulats de caoutchouc fins réduisant les vides et la perméabilité en conséquent [Ges14].

Aussi le taux d'absorption dans le cas de BCm10 et BCg10, est plus important que celui de béton de référence. Selon les résultats des travaux antérieurs, la pénétration des eaux est plus élevée quand le taux de substitution sous ses différentes façons, est supérieur à 12,5% [Ble15] ou bien 15% [Aze12]. Ganjani et al., ont évalué l'absorption d'eau et la perméabilité des bétons contenant des copeaux de caoutchouc, ils ont constaté que 5% de granulats de caoutchouc en remplacement des granulats naturels, donne un plus des composites plus perméable de 36% et le double en cas du remplacement de 10%, mais pas plus poreux, ce qui signifie que ce béton ne peut être utilisé dans des applications où la pression d'eau est présente [Gan09].

L'effet de la taille et la teneur des granulats de caoutchouc a été toujours la priorité des études des composites cimentaires caoutchoutés. Dans plusieurs recherches, une corrélation entre l'augmentation de l'absorption d'eau et la taille de ces granulats, a été prouvée. Ces composites ont été caractérisé par une diminution de l'absorption d'eau et par sa vitesse suite à l'augmentation de la teneur en caoutchouc [Seg00]. Bravo et al., ont rapporté que l'absorption d'eau par immersion, augmente avec la taille et la teneur en caoutchouc [Bra12].

La présence des granulats de caoutchouc n'agit pas à la faveur de l'absorption d'eau vue que leur densité est très inférieure à celle des granulats naturels et que leur coefficient d'absorption d'eau est négligeable [Ho10]. Les granulats de caoutchouc créent de l'air et n'absorbe pas l'eau remplissant ces airs en cas d'immersion. Ceci rend leur

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

utilisation défavorable pour les composites cimentaires. Ce résultat a été confirmé dans la recherche de Garros, qui a constaté que la nature hydrophobe du caoutchouc et la dimension de l'auréole de transition ont favorisé l'ascension capillaire [Gar07]. Benazzouk et al., ont conclu que la capacité d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc, cette constatation a été expliquée par le fait que le caoutchouc n'absorbe pas l'eau [Ben04]. Ceci, converge aussi vers ce qu'il a été mis en évidence par K-AB-Malek et al. au sujet du bon comportement du caoutchouc dans l'eau de mer, ils ont effectué des analyses poussées sur des échantillons de pneus se trouvant dans un bateau coulé par les Allemands pendant la 2ème guerre mondiale, 42 ans après toute les armatures sont absolument intactes, leurs caractéristiques mécaniques n'ont pas changées, seulement la teneur en eau du caoutchouc à légèrement changée en quelques points des pneus [Mal86].

L'emploi du caoutchouc, a causé une augmentation de la profondeur de perméabilité à l'eau et l'augmentation de l'absorption d'eau pour le remplacement des agrégats grossiers et a réduit l'absorption d'eau en cas du remplacement du ciment [Gan09, Sal07]

Les résultats obtenus, ont montré donc que les quantités d'eau absorbées par ces composites sont de même ordre de grandeur que celles proposées par la littérature sur des bétons contenant la même matière recyclée. Même s'ils n'existent pas des résultats correspondants à cet âge. Il est possible, d'affirmer que la relation entre l'absorption d'eau et l'ajout du caoutchouc dans le béton léger est tributaire de la teneur, la taille et la distribution de cette matière dans la matrice ainsi que l'âge.

4.8 Conclusion

Peu d'étude ont été menées, pour évaluer la durabilité du béton caoutchouté. Dans ce chapitre, une enquête expérimentale a été réalisée sur des bétons légers caoutchoutés dans des conditions extrêmes, afin d'étudier leurs processus de dégradation dans de telles conditions. Bien que les essais faits au laboratoire sur des éprouvettes, ne peuvent pas représenter typiquement les conditions réelles, les différents résultats et les conclusions déduites à partir de ces essais ont satisfait les critères de la durabilité.

Les bétons légers caoutchoutés présentent une bonne résistance et une sensibilité moindre aux cycles de gel-dégel par rapport au béton léger de référence. Les granulats de caoutchouc, ont soulagé la pression produite par la glace dans la matrice, en jouant le rôle d'un entraîneur d'air. Ces bétons légers ont présenté le même types de dégradations constaté sur le béton ordinaire, tels que l'élargissement des pores ainsi que l'écaillage des surfaces des éprouvettes. Les risques de rupture sont minimisés par la nature de ces granulats moins rigides et non absorbants lors de leurs mises en œuvre. Cependant, le recours à l'air entraîné est toujours nécessaire dans de telles conditions.

La détérioration des structures en béton, exposés à des environnements chimiquement agressifs ou difficiles, réduit la durée de vie des infrastructures civile. Leur durabilité dans de tels milieux est une nécessité pour l'amélioration de leurs performances et en conséquence la prolongation de leurs cycles de vie. Dans le cadre de cette recherche, il a été conclu que l'utilisation des granulats de caoutchouc a rendu le béton léger moins sensible dans ces milieux. Les cycles de mouillage-séchage, ont accéléré le processus de fissuration. En conséquence, les agents agressifs extérieurs, ont pénétré facilement dans sa matrice à travers ces fissures produites. Ces agents agressifs, réagissent avec les hydrates pour diminuer d'avantage leurs résistances. L'usage auxquels sont destinés ces bétons légers est sujet de cycles rapides de mouillage-séchage. L'action continuelle des agressions de son environnement

CHAPITRE 04 : Effets des granulats de caoutchouc sur la durabilité des bétons légers.

amplifie les dégradations. L'inclusion des granulats de caoutchouc à faibles teneurs, réduit le risque d'absorption de la solution acide. Les granulats de caoutchouc bloquent les chemins des fissures et empêchent par la suite la pénétration des agents agressifs à l'intérieur de la matrice. Le béton léger caoutchouté peut résister mieux qu'un béton léger ordinaire à l'attaque chlorhydrique HCl et résiste beaucoup plus à l'acide de sulfate de sodium Na_2SO_4 , ils présentent des détériorations qui sont plus au moins dépendante de la teneur en granulats de caoutchouc et la porosité, ainsi que la qualité de la zone d'interface produites par la présence de ces derniers, sans oublier la nature de l'acide lui-même. En conclusion, le processus de vieillissement par immersion dans une solution acide chlorhydrique HCl, produit des pertes de masse importantes, est apparu plus agressive que la solution Na_2SO_4 .

D'après l'état final des éprouvettes des bétons légers testées au feu auquel, à des cycles de chauffage-refroidissement de l'ordre de (200, 400, 600, 800 et 1000°C), on conclue qu'à un ajout mixte de granulats de caoutchouc (grossier et fin), à un taux de l'ordre de 5% (BCm5), la perte de masse est plus importante par rapport à un ajout de 10% (BCg10) de caoutchouc par substitution du gravier seul. A la fin de l'opération du chauffage les éprouvettes BCm5, BCm7,5 et BCm10 ont perdu environ 60, 38 et 36% respectivement de leurs masses initiales, alors que les éprouvettes BCg5, BCg7,5 et BCg10 ont perdu 36, 30 et 28%. La perte de masse augmente avec la diminution de la teneur en caoutchouc. Le béton léger de référence a perdu 30% de son poids, mais il a atteint un stade d'instabilité due au feu, plus avancé que ceux caoutchouté. Cependant, le fait d'assurer un enrobage des granulats de caoutchouc avec un liant hydraulique confère au composite contenant ces granulats, une meilleure résistance au feu.

L'évaluation expérimentale des propriétés acoustique des composites étudiés, a montré que la nature, la taille et la teneur en granulats de caoutchouc, affectent ses propriétés dans un sens positif. Ainsi, la légèreté des bétons légers caoutchoutés, a influencé ces propriétés, en lui rendant plus absorbant des sons et ayant un comportement élastique par rapport au béton léger de contrôle. L'âge de ces bétons légers a aussi montré son effet sur l'augmentation de leur compacité, et par conséquent, l'augmentation du module d'élasticité par rapport au jeune âge (à 28 jours). Ces résultats, ont permis de juger l'impact de l'emploi du caoutchouc dans le béton léger.

Selon les résultats du test d'absorption d'eau dans cette partie de recherche, on peut confirmer que la présence des granulats de caoutchouc à faible teneur ($\leq 10\%$) a de différentes tailles comblant les vides entre les granulats dans les composites cimentaires, à savoir les bétons légers, absorbent moins l'eau. L'eau est attiré vers la zone inter-faciale entre la pâte de ciment et le granulats de caoutchouc, mais ce dernier agit comme un film par sa nature hydrophile, il bloque son chemin et le repousse. La majorité des auteurs, qui ont fait des recherches sur les composites cimentaires incorporant le caoutchouc, ont démontré sa tendance à imiter l'absorption d'eau et qu'il ne peut pas être considéré comme un matériau absorbant l'eau.

À la lumière de ces résultats et ceux de plusieurs études, il apparaît clairement possible de réaliser un béton durable avec des granulats de caoutchouc. Cependant, il existe une très grande diversité de taille de ces granulats. Que ce soit la taille (petit ou gros granulats), la proportion dans le mélange, la porosité, l'absorption, la teneur en eau au moment de gâcher, tous ces paramètres singularisent les bétons légers. Le peu d'études réalisées sur la durabilité des composites cimentaires caoutchoutés, sont insuffisantes pour établir des corrélations, afin d'élargir les champs d'application de ces composites, lesquels sont une alternative fiable pour réduire les dommages que les bétons traditionnels subissent dans les périodes hivernale.

CHAPITRE 05
**Impact environnemental
du béton incorporant
des granulats de caoutchouc**

5.1. Introduction

La demande de matières premières augmente en raison du développement humain et de l'augmentation économique. Après des décennies de production, le béton qui consomme une grande partie de ces matériaux reste le matériau le plus utilisé dans l'industrie de la construction à ce jour. Par conséquent, la question qui se pose est jusqu'à quand les matières premières diminuant continuellement suffiront-elles?

Il est impossible de déterminer le volume des ressources naturelles ni la durée pendant laquelle, elles peuvent être consommées sans être épuisées puisqu'elles ne sont pas renouvelables. Ainsi, les experts s'attendent à ce que le problème du déséquilibre entre la demande de ces matériaux et leur volume s'aggrave, il est donc nécessaire de trouver une alternative. De nombreux pays ont souligné le besoin vital de nouveaux matériaux pour soutenir l'économie de la construction, étant donné que les décharges disponibles ne suffisent plus et sont en diminution rapide. Alors, une relation a été établie entre ce problème et la demande de récupération du flux de déchets solides non dégradables, pour faire face aux problèmes de durabilité, d'énergie et d'environnement à la fois.

L'utilisation des déchets dans la construction a appelé à de plus grands débats sur la satisfaction des conditions d'économie d'énergie qui en résultent et la réduction des émissions de CO₂, pour répondre aux exigences environnementales. Les économies d'énergie associées au processus de recyclage, sont similaires à la production de granulats broyés et la demande d'énergie sera similaire pour les deux procédés. Il est généralement admis que les matériaux de construction les plus utilisés actuellement ainsi que les méthodes de construction ne sont pas durables, avec des impacts environnementaux importants tels que la consommation d'énergie, la pollution, les poussières, l'épuisement des ressources naturelles et les émissions de CO₂. Dans la production de béton, le principal responsable de la production du CO₂ est l'utilisation de ciment Portland ordinaire avec un taux de contribution à peu près équivalent à 80-90% [Yan15]. Selon Viviana et al., l'industrie du ciment est responsable de 5% des émissions de CO₂ dans le monde [Viv17].

Plus d'attention devrait être accordée au choix des matériaux [Tho06]. Meddah a souligné que l'augmentation de la consommation d'énergie de toutes les sources, pourrait même contribuer au changement climatique mondial. Il a également révélé que la réduction des émissions mondiales de CO₂, pourrait être réalisée en sélectionnant des matériaux ayant un impact environnemental plus faible [Sed17].

De nombreuses études ont été réalisées pour démontrer la faisabilité de l'utilisation de différents produits de déchets en tant que substitut partiel des granulats naturels dans des bétons. Parmi ces déchets abondants; les pneus usés qui sont produits excessivement dans le monde chaque année. Environ 1000 millions de pneus atteignent la fin de leur vie utile chaque année et 5000 millions de plus devraient être jetés régulièrement d'ici 2030 [Sof17]. Aussi, Selon l'Institut des industries de recyclage de la ferraille (ISRI), 110 millions de pneus sont traités par l'industrie du recyclage chaque année; 70 millions de pneus sont recyclés en miettes de caoutchouc, surfaces de jeux, gazon synthétique et plus, 20 millions de pneus sont utilisés pour le remblai léger pour le remblai routier, l'amortissement des vibrations des rails et d'autres utilisations techniques (www.recycledrubberfacts.org). En Algérie, la quantité de pneus usés augmente de plus en plus. Il a été estimé que 2 millions de pneus, sont générés par an [Liberty, Algerian Journal, 06/09/2016].

Le caoutchouc a été recyclé pendant environ un siècle, mais la demande des pneus usés s'est considérablement développée au cours des deux dernières décennies (www.recycledrubberfacts.org). Le caoutchouc

CHAPITRE 05 : Impact environnemental du béton incorporant des granulats de caoutchouc.

issus des pneus usés, a été utilisé tel que des granulats fins et grossiers. L'Institut des industries de recyclage de la ferraille (ISRI), a noté que presque toutes les études menées dans le monde entier sur les granulats de caoutchouc, ont conclu qu'ils n'ont aucun risque pour la santé humaine (www.waste-management-world.com). D'un point de vue environnemental, l'acquisition d'agrégats de caoutchouc peut être considérée comme meilleure lorsque la coupe est comparée à l'extraction des matières premières; sa disponibilité à l'avenir n'est pas une préoccupation. Le recyclage économise des quantités impressionnantes d'énergie, ce qui réduit en fin de compte les émissions de gaz à effet de serre; le recyclage de quatre pneus réduit le CO₂ d'environ 323 livres, ce qui équivaut à 18 gallons d'essence (www.recycledrubberfacts.org). Le transport des granulats de caoutchouc n'affecte pas de manière significative l'équilibre environnemental et ne génère presque pas de gaz ou de particules dans l'air.

Récemment, les chercheurs ont montré un intérêt accru pour l'évaluation du cycle de vie des produits innovants. Il convient de noter qu'aucune recherche n'a été trouvée sur l'analyse du cycle de vie des matériaux de construction incorporant des pneus usés. La plupart des études dans ce domaine se sont concentrées uniquement sur l'étude de l'utilisation de pneus usés dans les cimenteries et les gazons artificiels. Fiskel et al., a indiqué une réduction des émissions de gaz à effet de serre, des substances toxiques de l'air et de la consommation d'eau. Chaque tonne métrique de carburant dérivé du pneu, substituée au charbon dans les fours à ciment, évite, selon les estimations, 543 kg (équivalent CO₂) d'émissions directes et indirectes. En tenant compte du CO₂ déductible du caoutchouc naturel, les émissions de gaz évitées seraient de 613 CO₂ kg éq. par tonne métrique [Fis11]. Cela indique la nécessité de l'évaluation de l'effet des matériaux modifiés sur l'environnement au cours de leurs cycles de vie.

Par conséquent, l'objectif de cet article est de quantifier les impacts environnementaux liés aux mélanges de bétons légers en utilisant l'analyse du cycle de vie (ACV) pour 30 ans, une (01) tonne de béton léger en tant qu'unité fonctionnelle. Les outils d'évaluation disponibles dans le domaine de la construction, sont basés sur différentes méthodes d'évaluation. L'estimateur ATHENA est utilisé dans la présente étude, les impacts environnementaux sont calculés par unité de poids.

Pour l'analyse du cycle de vie, la série de normes ISO 14040 de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), permettent d'évaluer les flux de matière et d'énergie, ainsi que les impacts environnementaux potentiels pendant le cycle de vie du béton. Les effets du remplacement des agrégats naturels fins et grossiers tels que le gravier et le sable dans les bétons légers sont étudiés à travers la demande énergétique et les impacts environnementaux potentiels tels que changement climatique, eutrophisation, acidification, particules, potentiel de smog, appauvrissement potentiel de l'ozone. Les sept (07) mélanges étudiés (tableau 3.7), sont formulés avec 5%, 5,7% et 10% d'agrégats de caoutchouc naturels, en remplacement des agrégats grossiers / fins et grossiers, ces mélanges sont comparés à un béton ordinaire. Dans le cas de la présente étude, L'impact environnemental associé à ces bétons légers, est estimé de la phase d'extraction des matières premières à la phase de leur mise en œuvre, les étapes de service et de fin de vie ne sont prises en compte.

5.2 ATHENA estimateur d'impacts

Les concepteurs ont recherché depuis toujours des moyens permettant de quantifier et d'analyser l'impact des constructions et d'autres produits sur l'environnement. Depuis un certain temps, un grand

CHAPITRE 05 : Impact environnemental du béton incorporant des granulats de caoutchouc.

nombre d'outils d'évaluation du cycle de vie ont été développés pour rendre ceci possible, en particulier avec l'accélération de l'industrialisation de tous les secteurs de vie

Pour faciliter l'évaluation environnementale et permettre aux différents acteurs de définir les enjeux relatifs aux impacts environnementaux d'un matériau ou un projet futur tels que le béton ou un bâtiment, plusieurs outils (Logiciels) comprenant d'importantes bases de données sont disponibles dans le commerce. Le choix de l'un de ces outils, est tributaire des informations disponibles relatives aux impacts, ce choix porte aussi sur la facilité d'utilisation du logiciel et sa capacité à réussir des études plus au moins complètes, comme il se base sur les différents avis et informations trouvés à son sujet.

Certains de ces logiciels, comportent des bases de données permettant de réaliser l'inventaire de cycle de vie et proposent également une caractérisation spécifique des impacts par le biais d'un nombre important d'indicateurs. Ces outils, fournissent aussi des données sur les produits et les procédés, qui sont utilisées pour compléter l'inventaire de l'analyse. Ils sont simples, sont sous forme de feuilles de calcul, dans lequel les quantités de matériaux peuvent être saisies, comme il peuvent être complexes agissant plus comme un logiciel d'estimation des coûts et des quantités des matériaux, alors que la qualité des assemblages doit être complétée.

Logiciel ATHENA, conçu par l'institut ATHENA au Canada, est choisi dans cette étude par ce qu'il est simple, facile à utiliser et à acquérir. Les raisons pour lesquelles d'autres logiciels n'ont pas été retenus, sont soit pour leur coût soit pour la complexité de leur utilisation.

Estimateur d'impact ATHENA, est consacré à l'évaluation des impacts environnementaux des bâtiments par la technique de l'analyse du cycle de vie. Ce logiciel, selon les figures (5.1) et (5.2), est conçu pour être utilisé à partir de la phase de conception préliminaire afin d'évaluer l'impact environnemental de différentes combinaisons de matériaux, de structures et d'assemblages. Il permet l'analyse des incidences environnementales des bâtiments de type industriel, institutionnels, commerciaux et résidentiels, pour nouveaux bâtiments ainsi que pour les rénovations majeures. Le type d'inventaire du cycle de vie de ce logiciel, permet à l'utilisateur de comparer l'impact environnemental des matériaux de construction et des assemblages à travers leur cycle de vie, de l'acquisition des matières premières à la fin de vie du bâtiment [Ath14].

Les assemblages qu'il propose, sont: les fondations, les poutres et les poteaux, les planchers, les toits et les murs. Pour autres types de composants, il y a une base appelée matériaux supplémentaires où ils peuvent être ajoutés.

Ce logiciel, comprend également une calculatrice pour convertir l'énergie primaire et les émissions liées afin de permettre aux utilisateurs de comparer les effets environnementaux et de l'énergie d'exploitation sur la vie du bâtiment. Le calculateur d'énergie de fonctionnement, nécessite une estimation séparée de l'énergie de fonctionnement en tant qu'entrée [Ath14]. Son système ne comprend pas la capacité de la simulation d'exploitation d'énergie, mais il permet à l'utilisateur d'entrer les données acquises avec d'autres manières (d'autres bases de données ou calculées) pour estimer l'impact du combustible et les relier aux résultats globaux.

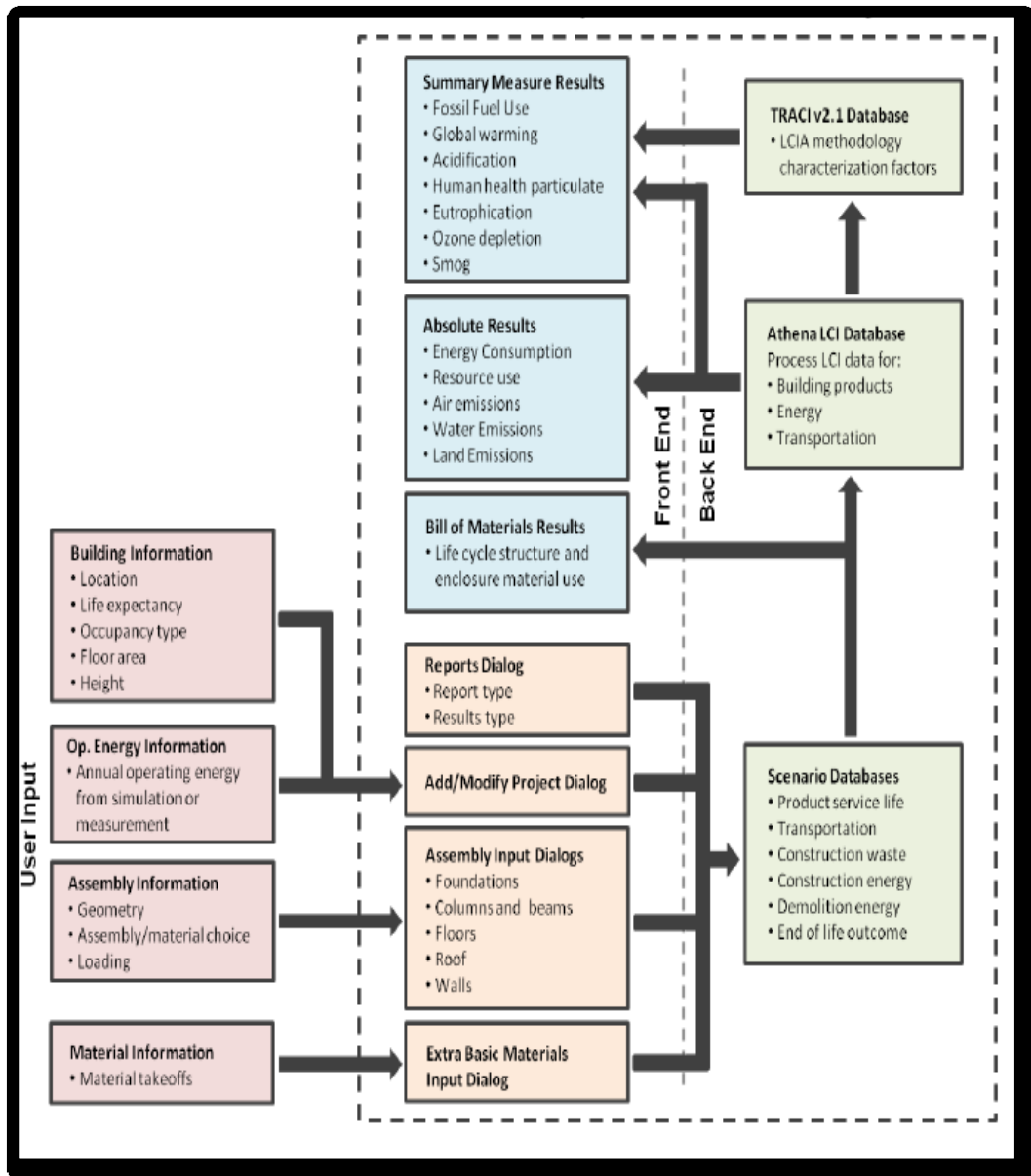


Figure 5.1 Processus d'estimation d'impact par ATHENA [Ath14].

L'utilisateur fournit au Logiciel ATHENA les données suivantes : la localisation du projet, à partir d'une liste des villes principales (Canadiennes et Américaines), la durée de vie prévue, le type de bâtiment et si ce dernier est principalement locatif ou habité par le propriétaire, les caractéristiques structurelles préliminaires du bâtiment: par ex. distance plancher plafond, distance entre les colonnes, épaisseur et composition de la dalle de sous-sol, permettant à l'utilisateur une modélisation rapide du bâtiment projeté, l'énergie opérationnelle annuelle par type d'énergie, comptabilisée grâce à un calcul ou simulation énergétique qui aurait été préalablement effectuée.

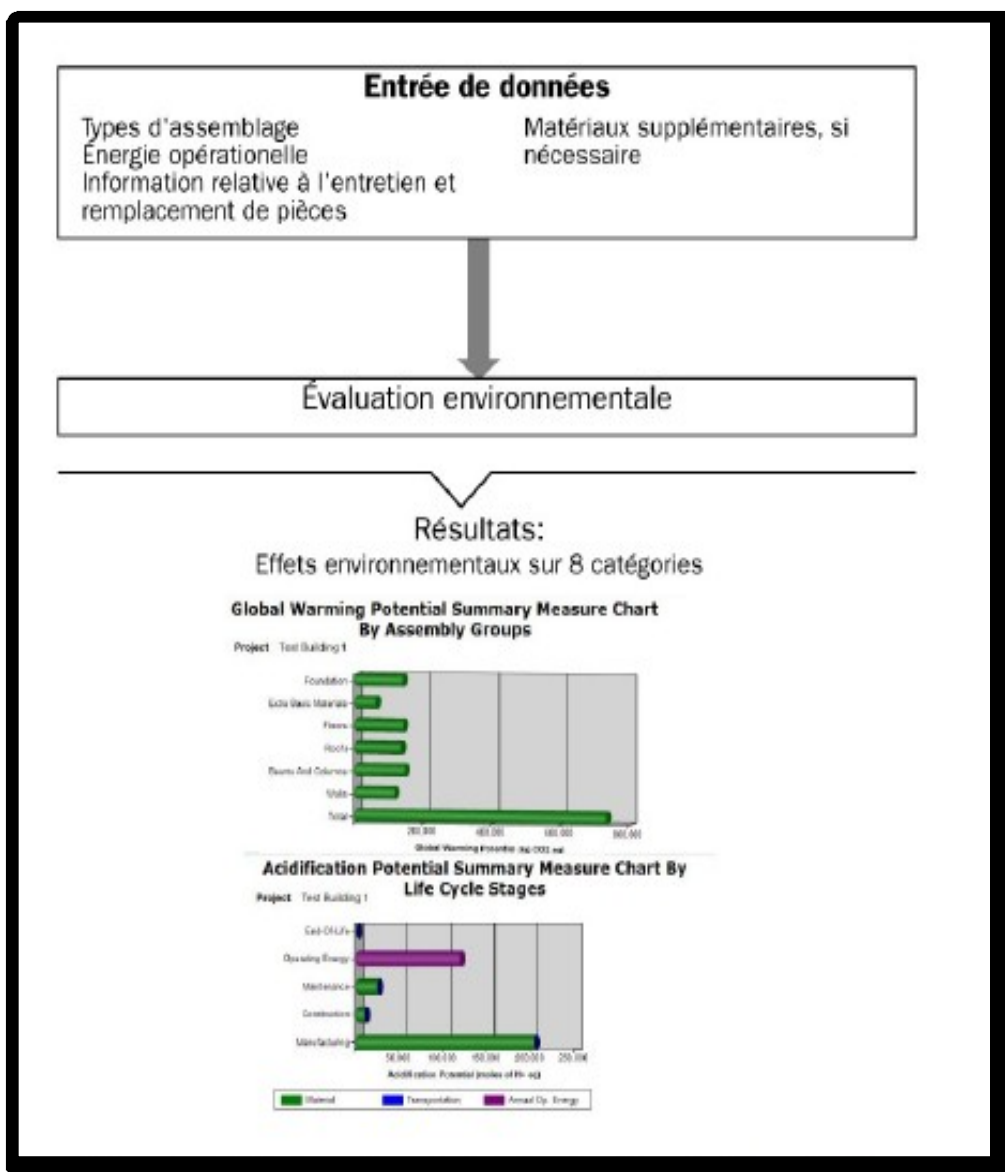


Figure 5.2 Les données entrantes et sortantes de ATHENA [Ath14].

L'estimation de la consommation énergétique du bâtiment peut être obtenue, en décrivant l'enveloppe extérieure de ce dernier. Une fois les paramètres entrés par l'utilisateur, ATHENA calcule et affiche l'impact environnemental selon les catégories du cycle de vie précitée.

Pour une utilisation au Canada, le modèle est divisé en six régions géographiques représentées par Vancouver, Calgary, Winnipeg, Toronto, Montréal et Halifax. Lorsque l'une de ces régions est sélectionnée, le logiciel se fonde exclusivement sur des données canadiennes, ce qui représente des technologies moyennes ou typiques de fabrication et des modes appropriés et les distances pour transport. D'autres villes figurant dans le logiciel désignent des régions de l'USA et leur sélection tourne sur les bases de données énergétiques, de transport et d'inventaire du cycle de vie des produits concernés. En termes de résultats, ce logiciel fournit un inventaire du cycle de vie détaillé des effets intrinsèques liés à la construction, ainsi qu'un ensemble de six mesures, comprenant l'énergie primaire (incarné) et l'utilisation des matières premières; potentiel de gaz à effet de serre (carburant et processus liés); mesures de la pollution de l'air et de l'eau ainsi que les déchets solides.

Les résultats prennent en compte [Ath14]:

- Extraction et la transformation des ressources;
- Fabrication de produits;
- La construction sur place d'assemblages;
- L'ensemble des transports;
- Cycles d'entretien et de remplacement sur une durée de vie du bâtiment étudié;
- La démolition du système structurel et le transport à la décharge.

5.3 Objectif de l'étude

Le but d'une évaluation environnementale, est d'examiner l'impact d'un projet et les modifications positives ou négatives qu'il occasionne sur le milieu après sa création d'un projet. Dans cette évaluation, tous les facteurs pouvant être une des causes de ces modifications, sont pris en considération. Par la suite, suivant les résultats, il peut être validé comme il peut être soit rejeté soit modifié de telle sorte que les impacts négatifs anticipés seront minimisés ou éliminés.

Il semble donc intéressant d'évaluer l'impact environnemental de tous les matériaux innovants, tels que les bétons légers caoutchoutés. Le but de cette étude, est d'évaluer l'impact environnemental de la substitution des granulats naturels en vue de les remplacer par des granulats de caoutchouc dans des bétons légers destinés à la réalisation des grandes surfaces. Sept compositions de bétons légers sont étudiées, trois (03) bétons légers dont 5, 7,5 et 10% du poids du gravier sont substitués, trois (03) autres sont étudiés avec la substitution de 5, 7,5 et 10% du poids du gravier et du sable à la fois. Ces compositions, sont comparées à un béton léger ordinaire gardant ses 100% de granulats naturels (tableau 3.7).

5.4 Normalisation de l'impact environnemental

L'analyse du cycle de vie, s'appuie sur la norme NF P 01-010, référentiel qui définit les informations pertinentes sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction et leur contribution aux impacts environnementaux d'un ouvrage donné, et formule les exigences sur l'origine des données et précise le cadre de leur présentation [Not09]. L'évaluation doit être faite dans un cadre normalisé, l'organisation internationale de normalisation (ISO), a formalisé la série des normes internationales ISO 14040, décrivant les caractéristiques essentielles de cette analyse pour le bon déroulement d'une telle étude (cadre méthodologique).

La ISO 14041, définit l'objectif et le champ de l'étude, elle cernée les données nécessaires permettant la quantification des impacts environnementaux. Cette norme, comprend un inventaire des consommations de ressources et des émissions dans l'environnement, elle consiste à collecter les données nécessaires à la réalisation de cet inventaire. La ISO 14042, fixe la manière de conversion des données développées au cours de la phase de l'inventaire tels que les consommations des ressources et des rejets dans l'eau, l'air et le sol en indicateurs d'impacts environnementaux. Dans la dernière étape, il y a le recours au ISO 14043, pour l'interprétation des résultats du cycle de vie, elle précise la manière dont les informations de l'analyse de cycle de vie se résume. Elle permet de tirer des conclusions et des jugements, selon les objectifs de l'étude déjà définie. Aujourd'hui, on trouve ces normes (ISO 14041, 42, 43) regroupées dans la norme ISO 14040. La norme ISO 14044 permet d'estimer les émissions sur tout le chemin parcouru par les bétons légers étudiés du moment où l'utilisateur décide d'en avoir jusqu'à son élimination.

5.4.1 Unité fonctionnelle de l'étude

L'unité fonctionnelle, peut être définie comme l'unité de comparaison qui garantit que les produits comparés fournissent un niveau équivalent de fonction ou de service [Sai06]. C'est une description du matériau à analyser, de telle sorte que l'analyse du cycle de vie peut être comparée à un cycle de vie d'un matériau similaire. Toutes les entrées et les sorties, seront développées par rapport à l'unité définie comme étant unité de volume de béton léger (10 m^3), afin d'avoir un volume suffisant pour la réalisation d'une grande surface de 100m^2 , ainsi qu'un bilan environnemental global, avec une perspective d'exploitation de 30 ans. Aussi, l'estimateur ATHENA, fournit des calculs relatifs aux travaux de réalisation d'un bâtiment, un tel volume (10 m^3) peut être comparable à d'autres études réalisées.

5.4.2. Inventaire de l'étude

Avant tout, les limites du système doivent être définies, le cycle de vie des bétons légers étudiés comprend de nombreux processus, donc connaître tous les procédés d'obtention des matières premières et de la fabrication du béton, est la clé de la réussite de l'analyse de ce cycle de vie.

Dans ce travail, cette analyse comprend la production et le transport des granulats et du ciment, la production du béton et son transport de la centrale à béton au site de construction. La phase de service y compris l'entretien et celle de fin de vie (recyclage, destruction, entreposage, revalorisation, etc.), sont exclus de l'analyse puisque les différents bétons légers, sont destinés pour le même usage et remplissent des conditions de durabilité comparables, en plus du manque d'informations précises dans ce sens. Les détails des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons légers faisant le sujet de cette évaluation, sont présentés au premier chapitre.

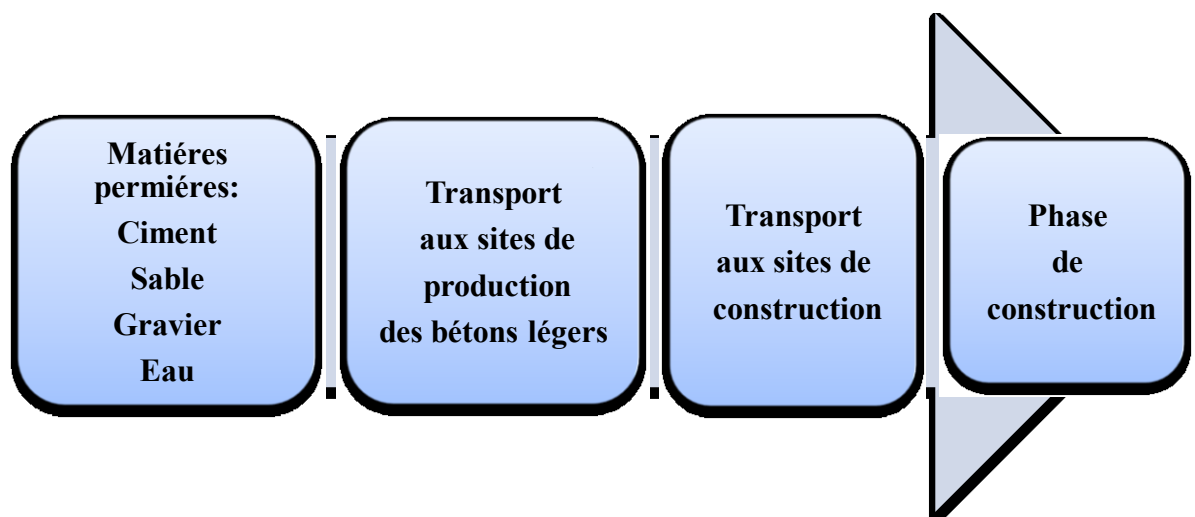


Figure 5.3 Cycle de vie des bétons légers analysés

Les données collectées, alimentant les l'outil d'estimation utilisé, sont indispensables et sont liées à l'unité fonctionnelle [Jan15]. Pour chaque processus, toutes les entrées sont introduites incluant la consommation des matériaux et des énergies entrant dans la production des bétons légers, les émissions dans l'air dans l'eau et dans le sol, sont prises en compte. En ce qui concerne les données relatives aux granulats minéraux, eau du robinet ainsi que le transport, ne peuvent être collectées auprès des entreprises et des fabricants locaux, car ils sont disponibles dans la

CHAPITRE 05 : Impact environnemental du béton incorporant des granulats de caoutchouc.

base des données du logiciel ATHENA. Les processus de leur production, sont basés sur des conditions canadiennes, alors que celles relatives à la production des bétons légers (malaxage, transport, mise en œuvre), sont collectées de la littérature.

L'utilisation du caoutchouc granulaire en tant qu'additif dans les composites cimentaires, est largement acceptée pour ces excellentes propriétés, malgré que le processus et l'énergie inhérente pour son obtention sont intensives. Le caoutchouc est généralement granulé avant son utilisation en différentes formes et dimensions. Ce processus de fabrication, peut être réalisé grâce à un large éventail de techniques de recyclage, allant des procédés mécaniques simples, qui coupent et compriment, simplement le caoutchouc à des procédés de traitements mécano-chimique ou thermiques extrêmement complexes, ce qui pose un défi important à l'adoption de cette technologie de recyclage. Cependant, avec l'augmentation des coûts d'enfouissement des pneus usagés, leur utilisation comme granulats dans le domaine de la construction, est devenu de plus en plus économiquement avantageux [Ade15].

Il a été toujours prouvé que la présence des déchets dans les décharges, en particulier, les déchets solides tels que les pneus usés, est responsable d'émission des gaz à effets de serre et d'une quantité élevée d'Ethène. Donc leur valorisation, contribue fortement à la réduction de leur impact négatif.

Le transport des matériaux à recycler ou à valoriser n'affecte pas fortement l'environnement, sauf dans le cas où la collecte de ces matériaux, est sélective et intense. En termes d'énergie le processus de recyclage est similaire au concassage des roches ou d'autres processus pour la production des granulats minéraux, donc les charges énergétiques ne peuvent pas être économisées [Mar10].

La valorisation des pneus usagés, pour produire des granulats, a son empreinte négative sur l'environnement, pour une tonne de pneus usagés, rien que pour leur préparation et leur transport, ils produisent un impact considérable.

Indicateurs	Impacts des étapes de transport et de préparation des PNUR (pour une tonne de PNUR)
Consommation d'énergie primaire totale (GJ)	0,5 à 3,2
Emission de gaz à effet de serre d'origine fossile (100ans, en Kg éq. CO ₂)	44 à 95
Emission de gaz acidifiants (g éq. SO ₂)	257 à 630
Emission de gaz Contribuant à la création d'ozone troposphérique (g éq. éthylène)	6 à 11,5
Consommation des ressources non renouvelables (kg éq. antimoine)	0,2 à 0,5
Consommation d'eau (m ³)	0 à 0,6
Rejets contribuant à l'eutrophisation (g éq. PO ₄)	62 à 116
Production de déchets (t)	0 à 0,2

Tableau 5.1 Série d'impacts produits par le recyclage des pneus usagés [Ade15]

D'après Philgea Moringa, la valorisation des pneus usagés par granulation, offre un meilleur bilan environnemental par rapport aux autres voies de valorisation sur l'ensemble des indicateurs. Les gains sont essentiellement liés aux économies des énergies et des émissions évitées [Ade15]. Apporter des matériaux alternatifs tels que les granulats recyclés, est parfois une charge de plus pour le constructeur à cause de leur disponibilité à des distances relativement longues. C'est pour cette raison que le caoutchouc, est introduit dans le calcul à des masses nulles.

Une évaluation de la demande d'énergie cumulée (DEC), peut être un bon point de départ pour une évaluation environnementale, en raison de sa simplicité dans le concept et sa comparabilité avec les résultats d'autres études [Her]. L'estimation de cette énergie est faite par le calcul des consommations des énergies et des ressources naturelles en fonction de la quantité des matériaux employés. Ce calcul, prend en compte l'énergie consommée dans chaque processus: la production du béton léger et son transport vers le site, l'utilisation du matériel de construction sur le site et l'énergie nécessaire pour sa mise en œuvre.

Les bétons légers de cette étude sont supposés fabriqués dans une centrale de béton où les composants sont malaxés avant d'être transportés aux sites de construction, l'énergie consommée pour cette opération est supposée 0,025 GJ/tonne (0,06 GJ/m³ de béton léger), cette hypothèse est tirée de la littérature [Her].

Pour le transport, l'énergie consommée attribuable aux bétons légers étudiés, est comptabilisée en se référant à la distance et sans spécification des types et des capacités des moyens utilisés pour atteindre les sites de construction. Les bétons légers, sont supposés transportés en camion vers des sites se situant à 30 km de la centrale du béton, le carburant diesel, est supposé le principal combustible utilisé. L'énergie de vibration et du compactage des mélanges coulés sur place, sont exclus des calculs car ils sont pratiquement négligeables. Le pesage et le malaxage des composants du [Her] et le transport aux sites de construction et mise en œuvre des bétons légers de [Hee12].

Les calculs des énergies cumulées dépensées dans le processus de la production des mélanges étudiés figurent dans les tableaux 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 et 5.9.

5.4.3. Evaluation de l'impact environnemental

Les effets de l'utilisation des ressources et les émissions générées sont, regroupés et quantifiés dans un nombre limité de catégories d'impacts, ils peuvent être pondérés en fonction d'importance. Chaque donnée de l'inventaire, est attribuée à une catégorie d'impact appropriée. Les catégories d'impact prises en compte dans l'analyse du cycle de vie des matériaux de cette étude, sont ceux que la plupart des spécialistes de l'environnement acceptent dans le monde entier, elles sont les suivantes :

- . Effet de serre;
- . Eutrophisation;
- . Acidification de l'atmosphère;
- . Consommation de ressources;
- . Consommation de ressources naturelles fossiles (énergie);
- . Consommation de ressources naturelles minérales;
- . Demande d'énergie cumulée.

CHAPITRE 05 : Impact environnemental du béton incorporant des granulats de caoutchouc.

La préservation de l'énergie est devenue un impératif économique dans le secteur de la construction, continuant d'être un grand consommateur d'énergie dans le monde entier, elle est comptabilisée par la consommation des ressources énergétiques, c'est-à-dire la somme de l'énergie primaire issue de sources renouvelable et non renouvelable, dont 90% de cette énergie résulte des ressources non- renouvelables [EIA14].

5.4.4 Résultats et interprétations

L'analyse du cycle de vie faite dans cette étude, permet une comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des différents bétons légers, en se basant sur l'inventaire des données décrit précédemment et en fonction d'une unité fonctionnelle identique. Nous avons essayé, d'évaluer ces impacts ainsi que les gains réalisés dans la réduction des émissions produites par ces matériaux. Les résultats ont montré, qu'il existe de nombreux facteurs qui doivent être examinés pour déterminer l'impact environnemental global d'un matériau de construction. Les résultats sont présentés sous forme de graphiques, illustrant l'ensemble des matériaux en fonction d'une seule catégorie d'impact environnemental, ensuite ils sont présentés plus détaillés, sous forme de tableau en annexes. L'analyse du cycle de vie, montre que le béton léger de référence, présente des impacts environnementaux plus ou moins plus élevés que les bétons légers dont on a substitué une quantité des matériaux entrant dans sa composition, la différence entre eux est modérée, mais elle est discutable.

Le changement climatique, estimé en $\text{kg CO}_2 \text{ éq}$ étant la substance standard pour cet indicateur, a subi une réduction par rapport au béton léger de référence de l'ordre de 0,24 à 0,48% pour la composition (BCg) et de 0,73% pour l'ensemble des bétons légers de la composition (BCm) (Figure 5.4).

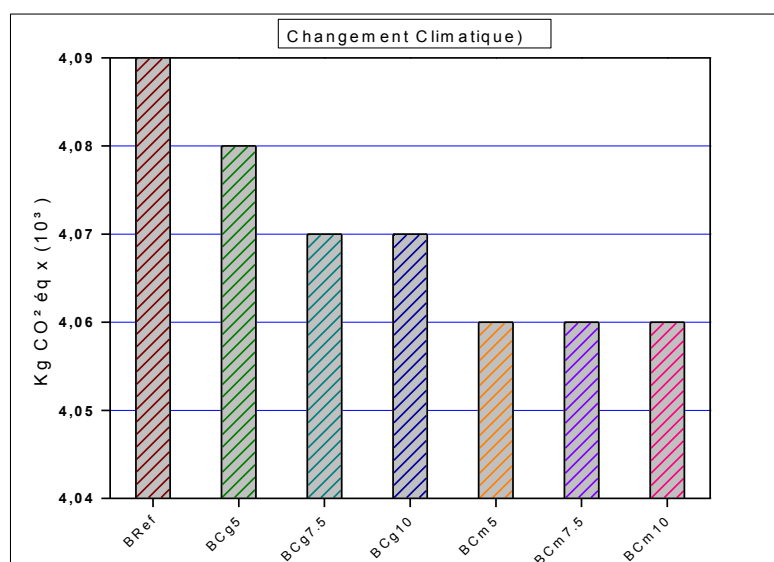


Figure 5.4 Contribution des bétons légers analysés au changement climatique.

La production et le transport des matières premières, sont l'ultime responsable de cet impact, en particulier le ciment, se situant parmi les matériaux les plus énergivores et contributeurs aux émissions du CO_2 dans l'atmosphère [Bab09].

CHAPITRE 05 : Impact environnemental du béton incorporant des granulats de caoutchouc.

Cet indicateur, a fait l'objet de nombreuses recherches au cours de ces dernières années. Il est à noter qu'il est le seul indicateur calculé sur 100 ans par plusieurs méthodes d'évaluation environnementale, ce qui lui permet d'être comparable avec les résultats variant d'une étude à une autre, mais les compositions doivent être semblables ou légèrement différentes avec un cycle de vie passant par les mêmes scénarios. A cet effet, aucune comparaison n'est possible, vu la particularité des compositions proposées dans ce travail de recherche.

L'acidification atmosphérique estimée en kg SO₂ éq, est responsable de l'augmentation de la concentration des ions d'Hydrogène dans l'eau et le sol. Cet indicateur d'impact, diffère selon les caractéristiques régionales et environnementales [Tae16a]. Ses résultats, ont connu aussi une réduction de l'ordre de 0,51 à 1,03% pour la composition (BCg) et d'environ 1,54% pour la composition (BCm), cette réduction en termes d'impact d'émissions du SO₂, est relative aux quantités des matériaux substitués (Figure 5.5).

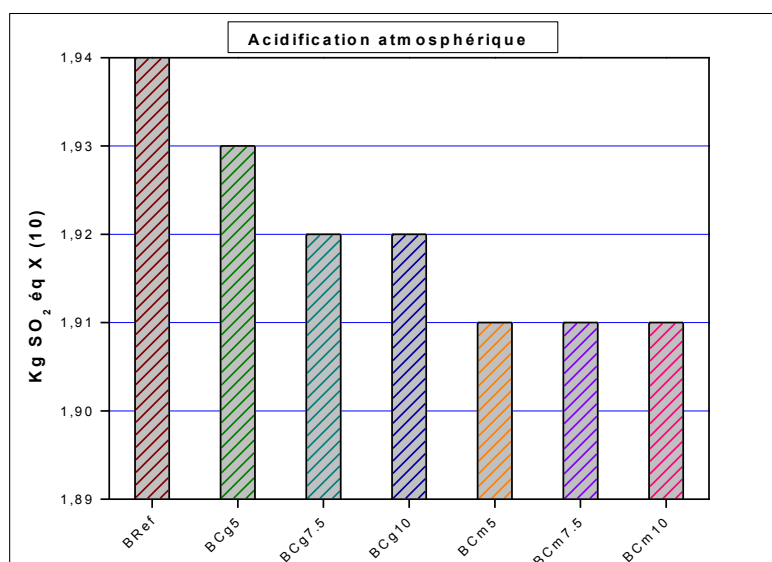


Figure 5.5 Contribution des bétons légers analysés à l'acidification atmosphérique.

On peut dire que les processus de production et d'extraction des matières premières pour l'obtention des matériaux de construction sont responsables en grande partie de la production des polluants atmosphériques conjointement avec les énergies consommées. Cet impact, est favorisé surtout par la libération du dioxyde de soufre (SO₂) émis en raison de l'utilisation de dynamite qui se compose d'acide sulfurique, d'acide nitrique et des substances du soufre [Tae16a]. La raison pour laquelle il est réduit dans le cas des bétons légers étudiés, est essentiellement due à la réduction du transport [Bra13], suite à la réduction de la quantité du gravier et du sable, ce qui minimise aussi la libération des matières organiques et la poussière dans l'air. Aussi, les polluants d'air tels que SO₂ et NO_x, résultent de la combustion des combustibles fossiles et de la matière première contenant du soufre [Bab09].

En ce qui concerne la pollution d'air par émission toxique de matières particulaires, estimées en kg PM_{2,5} éq, la substitution partielle des matériaux à de faibles taux a réduit cet impact par 0,88 à 1,76% pour la composition (BCg). Cette réduction est un peu plus significative pour la composition (BCm) enregistrant 2,35% pour (BCm5) et (BCm10) et 2,65% pour (BCm7,5) (figure 5.6).

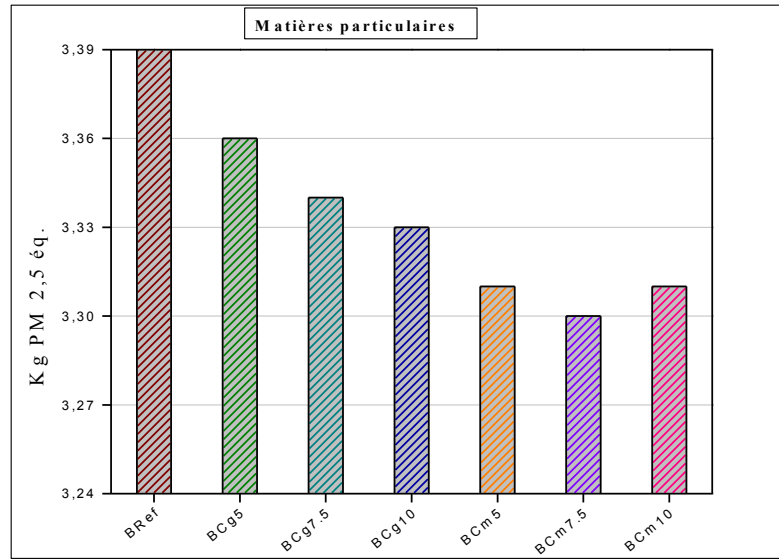


Figure 5.6 Contribution des bétons légers analysés à génération des matières particulaires.

Cet impact, caractérise la poussière générée au niveau des sites d'extraction de la matière première et des chantiers de construction et celle provenant de la combustion du carburant lors du processus de transport. La distance pour atteindre les sites de construction, est inchangeable (30 km), donc la quantité des matériaux transportés, est la seule explication de cette diminution.

Les processus d'obtention des matières premières doivent polluer moins, afin de les considérés comme matériaux durables [Fra11], la réalisation de ceci, est un vrai défi par le fait que les matériaux sont complexes dans leurs composition minéralogique et leur processus d'obtention. Le ciment, en particulier, génère des quantités considérables de polluants atmosphériques, en plus de la poussière produite lors de l'exploitation des gisements des agrégats; le sable en particulier, ainsi que les procédés de la production des composites cimentaires (chargeurs, mélangeurs, etc...) et la circulation des engins dans le site de construction poussiéreux lors de leurs transport [Bab09]. D'autres études dans ce sujet, ont montré que l'effet le plus marqué, est du aux particules liées aux combustions des carburants selon leur taille et leur composition.

L'Eutrophisation, estimé en kg N éq, a été aussi affectée par la substitution partielle du gravier et du sable. Une réduction de l'ordre de 0,87 à 1,62%, est enregistrée pour la composition (BCg), environ 2,36% pour (BCm5) et (BCm10) et 2,62% pour (BCm7,5) (Figure 5.7).

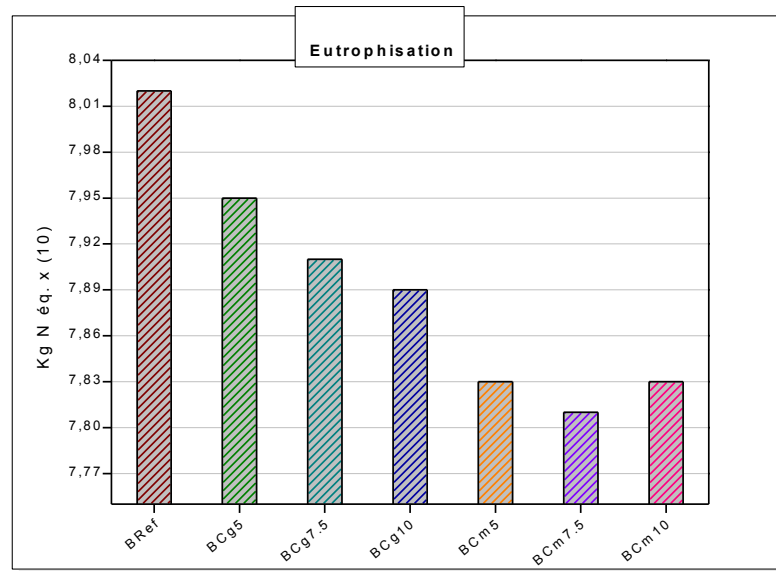


Figure 5.7 Contribution des bétons légers analysés à l'eutrophisation.

Ce qui est constaté, est que les bétons légers contenant moins de granulats minéraux, ont un impact moins négatif que le béton de référence. Donc ceci peut être toujours relié à la quantité des granulats naturels employés dans leur fabrication. Cet indicateur caractérisant les eaux de surfaces et même les eaux souterraines, en détectant la présence des nutriments nocifs, survenus lors du processus d'extraction de la matière première et la production des bétons légers étudiés.

En effet, les eaux usées issues des rejets des eaux de lavage et de nettoyage des équipements (centrale à béton) des chantiers se situant au voisinage de ces eaux, sont souvent recueillis par ces derniers. Ce mécanisme responsable de cette contamination, se traduit par une minimisation de l'Oxygène de l'eau. Ceci, peut affecter la potabilité des eaux (50mg de nitrate/l) qui nécessitent dans la plupart des cas, de diluer et de traiter les eaux brutes avant d'être distribuées et de prévoir des mesures jugées utiles pour la préservation et la restauration de la qualité de ses ressources en eau [Vin].

la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, est estimée en kg CFC-11 éq par kg d'émissions étant la substance sélectionné par ATHENA comme matériaux de référence parmi 23 types de matériaux (CFC-11, Halons, 1301, CFC114, etc..) et est suggérés par l'organisation météorologique mondiale [Tae16a]. L'écart entre les résultats de cet indicateur est faible surtout dans le cas de la composition (BCg) ou on a substitué le gravier seul. Les résultats présentent une réduction de l'ordre de 0,5 à 1,17% pour cette composition et 1,84% pour (BCm5) et (BCm7,5) et 1,68% pour (BCm10) (Figure 5.8).

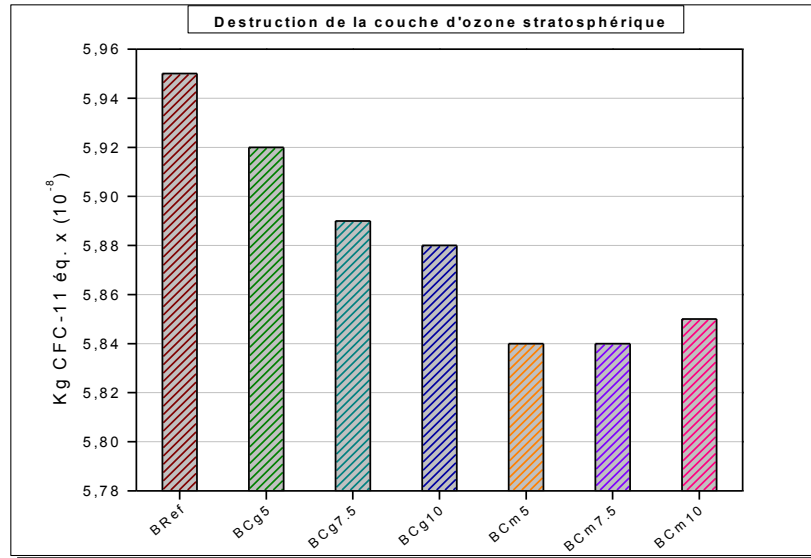


Figure 5.8 Contribution des bétons légers analysés à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique.

Cet indicateur exprime la qualité d'air, il diminue relativement à la quantité réduite des matériaux produits exploités et transportés du site d'extraction au site de construction.

La formation d'ozone photochimique, relative à la pollution d'air a été analysée et estimée en kg O₃ éq. Les bétons légers étudiés, ont montré un impact plus faible par rapport au béton léger de référence où on a employé plus de granulats naturels. En ce qui concerne la formation des agents nocifs, qui sont à l'origine du brouillard au-dessus des milieux de leur emploi, la réduction de ce phénomène, a été d'environ 1,16 à 2,03% pour la composition (BCg) et d'environ 2,9 à 3,2% pour la composition (BCm) (Figure 5.9).

L'impact de la consommation des énergies primaires totales, dépensées lors de l'extraction et la production des matériaux, estimé en MJ, est réduit d'environ 0,82 et 1,09% pour la composition (BCg) et (BCm), respectivement. Les granulats substitués à faible taux des mélanges étudiés, ont permis la réduction de la consommation des énergies non-renouvelables d'environ 0,28 à 0,57% pour la composition (BCg) et 1,15% pour (BCm) (Figure 5.10).

La combustion d'énergie fossile, a été la première activité humaine responsable de l'émission des gaz à effet de serre, selon l'agence internationale de l'énergie. Dans cette étude, la consommation des combustibles fossiles, a été réduite d'un maximum de l'ordre de 1,46% pour la composition (BCm). Cet indicateur a enregistré des différences insignifiantes puisque la quantité des matériaux substitués est aussi petite, elle serait plus intéressante si le taux de substitution serait plus grand (Figure 5.11).

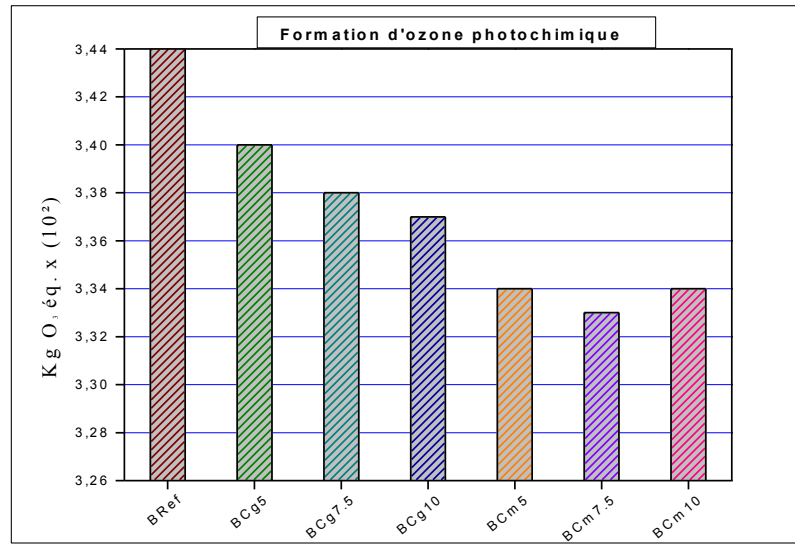


Figure 5.9 Contribution des bétons légers analysés à la formation d’ozone photochimique.

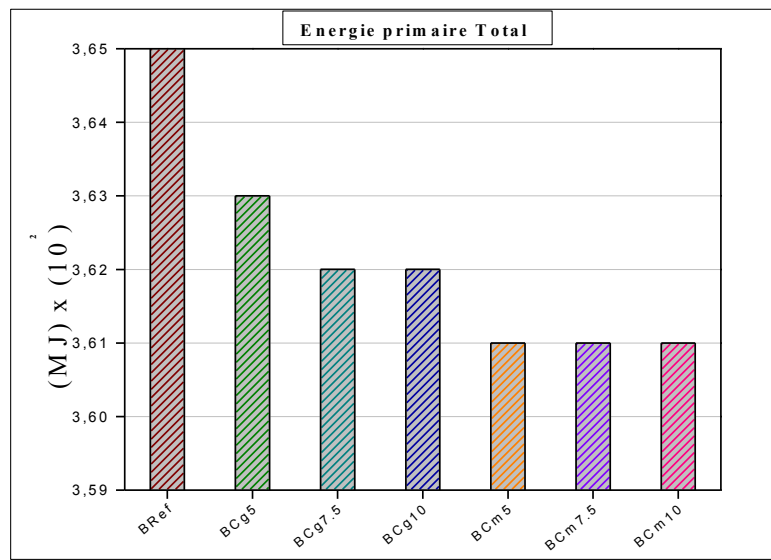


Figure 5.10 Contribution des bétons légers analysés à la consommation de l’énergie primaire totale.

En ce qui concerne la demande en énergie cumulée, un simple calcul est fait à la lumière de chaque étape ou processus inclus dans le champ d’étude précédemment défini et à la base des données. Les résultats de cet indicateur (figure 5.12), montrent qu’en particulier, le transport des bétons légers aux sites de construction demande plus d’énergie malgré que le transport des employés (Ouvriers et responsables des chantiers) n’est pas pris en compte dans les calculs. L’estimation de l’impact du transport prend en considération la production du carburant et sa combustion dans le camion ou la centrale à béton pendant le transport des mélanges du site de production au chantier

CHAPITRE 05 : Impact environnemental du béton incorporant des granulats de caoutchouc.

de construction. Selon Esin, chaque étape du processus de fabrication des matériaux, nécessite le transport et implique une consommation d'énergie jusqu'à environ 2,2% de la totalité du cycle de vie [Esi07].

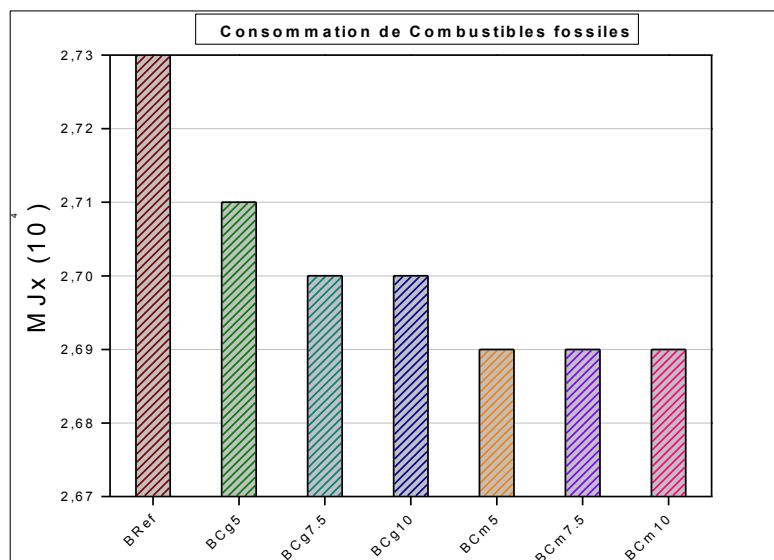


Figure 5.11 Contribution des bétons légers analysés à la consommation des combustibles fossiles.

Les résultats montrent aussi, que cette demande en énergie est moins importante pour le béton léger ayant la masse volumique la moins importante, ce qui prouve la proportionnalité de ces deux paramètres l'un à l'autre.

Le processus d'extraction et de récolte des matières premières de leurs sources naturelles, est considéré énergivore et génère de la poussière. Cette étape, a un impact direct sur l'environnement par de diverses manières. Il cause la pollution des eaux souterraines et des surfaces [Hal08], ainsi que de graves impacts sur la santé humaine.

D'après ces résultats, on remarque que la substitution d'une quantité des matériaux minéraux dans le but de les remplacer avec des granulats de caoutchouc, induit de légère diminution des impacts environnementaux des bétons légers. En effet, la différence entre les résultats du même indicateur des différents bétons légers, n'est pas significativement variable. Cela s'explique surtout par le faible taux de substitution et la diminution du poids des bétons légers transportés vers les sites de construction. En outre, il est évident qu'ils ne sont pas représentatifs du fait que l'étape de service et de fin de vie, marquant les impacts les plus importants, étaient exclus des cycles de vie des bétons légers.

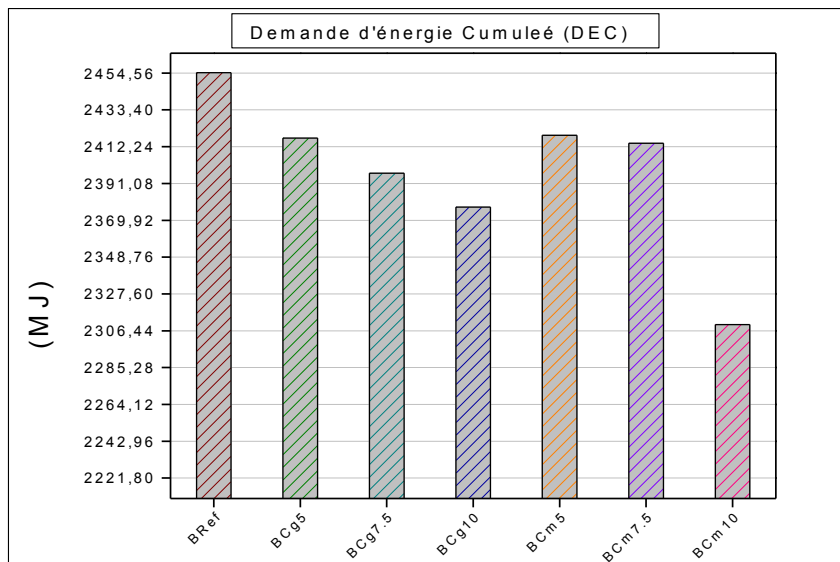


Figure 5.12 La demande d'énergie cumulée par les bétons légers analysés

Plus d'attention devrait être accordée au choix du matériau [Tho06], la sélection des matériaux de construction, joue un rôle important dans la réalisation de l'objectif du développement durable dans l'industrie de la construction [Fra11]. Les opérations minières, de traitement et de transport des matières premières, impliquent la consommation d'importantes quantités d'énergie et la génération de la poussière nuisant à l'environnement [Kum01]. Donc, l'utilisation de ces bétons légers avec des compositions contenant moins de granulats minéraux permet de réduire l'ensemble des impacts environnementaux analysés.

L'analyse du cycle de vie, faite dans cette étude est de type comparatif, dont les éléments communs ont été exclus du cycle de vie tels que le terrassement, la circulation et l'éclairage. Ainsi, les résultats sont sensibles aux caractéristiques des études disponibles dans la littérature et à leur diversité suite aux différents choix technologiques (type de procédés de recyclage, de production et combustible économisé ou utilisé, etc...) [Bil02].

5.5 Conclusion

Cette étude, a permis la comparaison les émissions libérées et les énergies consommées dans le cycle de vie des bétons légers étudiés, dont ont a substitué 5, 7,5 et 10% des granulats naturels et un béton de référence gardant ces 100% de ces granulats. Les résultats ont montré, de légères réductions dans les résultats des différents indicateurs d'impacts évalués, ces réductions sont d'environ 3%, vu que les taux de substitution sont faibles. Ainsi, il convient de rappeler que la phase de service et de fin de vie des bétons légers étudiés sont exclus du cycle de vie, suite au manque d'informations en ce qui concerne les énergies consommées ou bien économisées pendant cette phase.

La comparaison des deux compositions de bétons légers (BCg et BCm), met en évidence, que la composition où on a substitué le gravier et le sable à la fois, réduit le plus les impacts environnementaux, donc elle est bien avantageuse du point de vue environnemental. Par ailleurs, des taux de substitution plus élevés, produisent des impacts plus faibles. Ainsi, la substitution des granulats tels que le sable et le gravier des bétons légers analysés,

CHAPITRE 05 : Impact environnemental du béton incorporant des granulats de caoutchouc.

est moins prometteuse pour la minimisation des impacts environnementaux, puisque le dosage en ciment ; étant le liant difficile à remplacer, a été maintenu constant.

Les charges environnementales du transport de 10m^3 , ainsi que la demande en énergie cumulée sont réduites aussi. Les agrégats fins et grossiers, ont le plus grand impact sur l'acidification et l'eutrophisation dans le processus de production du béton, ainsi que tous les autres impacts. Cela explique, le fait que la composition (BCm) dont le gravier et le sable à la fois sont substitués, s'est montrée favorable pour l'environnement en termes de consommations des énergies et des émissions des polluants atmosphériques.

Dans les bétons légers ayant des compositions allégées en granulats naturels, les granulats de caoutchouc peuvent être employés en remplacement des granulats substitués. Leur soumission aux marchés peut être bénéfique pour l'environnement.

CONCLUSIONS GENERALES

Perspectives

Recommandations

1. Conclusions générales

Les matériaux innovants, leurs durabilités et leurs impacts sur l'environnement sont devenus la problématique de la majorité des recherches dans le domaine de génie civil. C'est dans ce contexte que cette recherche a été proposée, dont l'objectif est d'étudier des bétons légers âgés de cinq (05) ans, incorporant partiellement des granulats de caoutchouc à des taux de substitution de l'ordre de 5, 7,5 et 10%, pouvant potentiellement constituer une alternative importante aux bétons légers classiques dans certaines applications tels que les grandes surfaces.

Le travail visé a été donc, d'examiner le comportement des bétons légers caoutchoutés dans des conditions environnementales agressives et d'étudier par la suite, l'effet de ces bétons légers sur l'environnement dans lequel ils seront utilisés. Dans ces deux axes de cette recherche, deux travaux ont été menés, un travail expérimental dans le laboratoire LGCE de l'université de Sidi Bel Abbes où les moyens sont trop limités, et un travail de simulation, le premier de son genre par rapport aux travaux déjà réalisés, en utilisant l'outil d'estimation d'impact environnementale ATHENA.

En premier lieu, une synthèse bibliographique a été réalisée, enquêtant sur les qualités, que peuvent offrir les composites cimentaires caoutchoutés à une construction, suivi par un état de l'art sur l'utilisation de ces composites dans plusieurs applications à savoir le domaine des travaux publics. Une investigation expérimentale élargie sur les différents agressions environnementale, pouvant affectées la durabilité des bétons légers étudiés, tels que : l'attaque par les acides (Sulfate de sodium (Na_2SO_4) et acide chlorhydrique HCl), hautes et basses températures (des cycles de chauffage et de refroidissement: 200, 400, 600, 800 jusqu'à 1000°C, des cycles de gel-dégel jusqu'à 100 cycles), l'absorption d'eau et l'émission acoustique, sont aussi étudiés. Dans ce travail de recherche, la perte de masse a été utilisée autant qu'un indicateur de durabilité. Une autre partie de cette étude, porte sur une analyse comparative des cycles de vies de ces bétons légers, allant de l'extraction de la matière première à la mise en œuvre des mélanges.

L'investigation expérimentale a permis de mettre en évidence, l'effet des conditions environnementales sur les mécanismes de dégradation, par des essais de vieillissement accélérés, qui ont été conçu pour être représentatifs, afin de réduire la durée et le cout de cette investigation. Les résultats de cette investigation, convergent à ceux trouvés dans la littérature, ils sont influencés par le taux d'inclusion des granulats de caoutchouc ainsi que leurs tailles et leurs formes et sont décrits comme suit:

Les bétons légers incorporant des granulats de caoutchouc ont pu résister aux cycles répétitifs de gel-dégel, il a été constaté des détachements des granulats de caoutchouc se trouvant à la surface en laissant à leurs places des pores, ceci a été expliqué par la perte d'enrobage de ces granulats suite à son expansion. Généralement, les formes de détériorations les plus significatives, qui ont apparus sur les bétons légers, sont des microfissures peu profondes et des micropores sur les surfaces des éprouvettes testées. Les bétons légers contenant 10% de granulats et de poudrette de caoutchouc (BCm10), sont relativement les moins affectés par cette exposition (perte de masse de l'ordre de 3 %).

Les granulats de caoutchouc ont la capacité d'amortir l'énergie d'expansion et ont allégé la pression hydrostatique. Les dégradations constatées sur le béton léger classique sont de types élargissement des pores

Conclusions générales, perspectives et recommandations

ainsi que des effritements des surfaces des éprouvettes, ces dégradations sont moins remarquables dans le cas des bétons légers caoutchoutés.

La durée de vie des constructions en béton, les infrastructures en particulier, se détériorent lorsqu'ils sont implantés dans des environnements chimiquement agressifs. Pendant l'essai par attaque d'acide de sulfate de sodium (Na_2SO_4), les pertes de masse ont été insignifiantes ne dépassant pas 2,62% et 1,97% pour béton léger de référence et les bétons légers caoutchoutés, respectivement), avec formation des microfissures. Ces derniers, ont modifié la perméabilité des bétons légers et par conséquent sa résistance à ce type d'attaque chimique. Ce qui a été constaté aussi, est que l'ajout des granulats de caoutchouc et leurs existence à la surface en particulier, a été efficace pour réduire la perte de masse des mélanges exposés à l'attaque en raison du contacte minimisé des granulats naturels avec l'acide de sulfate de sodium et en raison de sa faible absorption des solutions.

Donc, les bétons légers caoutchoutés, ont montré une résistance accrue contre l'attaque de l'acide de sulfate de sodium, ceci est dû essentiellement aux caractéristiques particulières des granulats de caoutchouc, alors que le béton léger de référence, a été moins résistant. En conclusion, la meilleure façon pour introduire les granulats de caoutchouc dans les bétons légers, pour avoir de meilleures performances vis-à-vis à l'attaque de l'acide de sulfate de sodium à une concentration de 5% est l'utilisation des granulats de caoutchouc à de différentes tailles et à un taux de substitution se situant entre 7,5 et 10%.

Les résultats du pH des solutions acide (Na_2SO_4), dont on a immergé chaque béton léger séparément, ont passé d'un pH d'environ 5 à 6, avant le début de l'essai à un pH entre 8 à 10 pour les différents bétons légers de référence, BCg10, BCm7,5 et BCm10, alors que les autres solutions d'acide contenant les bétons légers caoutchouté BCg5, BCg7,5 et BCm5, ont présenté un pH= 8 à 9. Ce changement, est expliqué par l'augmentation de l'alcalinité des solutions d'immersion d'où la diminution de leur acidité, en particulier, celles contenant les bétons légers incorporant moins de granulats de caoutchouc.

En ce qui concerne l'attaque par acide chlorhydrique HCl, les différents bétons légers, ont enregistré des pertes de masse considérables. Pendant toute la durée d'exposition à la solution d'acide, le béton léger de référence et (BCm10), ont enregistré les pertes de masse les plus importantes, contrairement aux (BCg7,5) et (BCg10).

En général, les pertes de masses enregistrées lors de l'étude des bétons légers caoutchoutés, sont moins significatives par rapports au béton léger de référence. Cette constatation, est en relation directe avec la teneur globale du caoutchouc introduit dans les mélanges. La composition (BCg), en particulier dans le cas du (BCg7,5) et (BCg10), a enregistré des changements massiques moins importants que ceux de la composition (BCm). Les pertes de masse correspondant aux renouvellements de la solution d'acide chlorhydrique sont significatives, par rapport à celles enregistrées pendant les autres cycles d'exposition. Donc, l'attaque est relative à la concentration des acides, à leurs solubilités et à l'existence ou pas de sources de renouvellement de cet acide.

Le pH des solutions d'acide chlorhydrique, se situe entre 1 et 2, il change ensuite légèrement et progressivement avec le temps d'immersion, à 90 jours d'essai, le pH de la solution contenant le béton de référence, a atteint un pH de 7 à 8, alors que pour celles contenant les bétons légers caoutchoutés le pH a été

Conclusions générales, perspectives et recommandations

entre 5 à 6. Les bétons légers contenant plus de granulats naturels, ont été les plus réactifs avec l'acide, alors que le caoutchouc est inerte. Cette variation, est donc dépendante de la solubilité des différents éléments, ce qui peut influencer la stabilité de la matrice cimentaire. Ce qui justifie, la dégradation accélérée des bétons légers immergés dans les solutions d'acide chlorhydrique, ayant un pH inférieur à 9 qui est généralement agressive pour les composites cimentaires.

En plus du changement massique, le changement dimensionnel a été fortement constaté. Les bétons légers caoutchoutés, ont été moins affectés, la présence des granulats de caoutchouc a amélioré la résistance des parties exposées à l'attaque de l'acide de HCl.

Les bétons légers formulés en substituant le gravier par des granulats de caoutchouc (BCg7,5 et BCg10), exposés à l'acide chlorhydrique pendant 90 jours, sont plus durables que ceux formulés en substituant partiellement et conjointement le gravier et le sable.

L'inclusion des granulats de caoutchouc à faibles teneurs a réduit le risque d'absorption de la solution d'acide, suite à la nature hydrophobe des granulats de caoutchouc, contenant des additifs stabilisant sa structure en présence des produits chimique, bloquant les chemins créés par les fissures et en empêchant par la suite la pénétration des agents agressifs à l'intérieur de la matrice cimentaire, en conséquence, les bétons légers incorporant ces granulats développent leurs résistances aux attaques des acides.

L'attaque de l'acide chlorhydrique HCl à ces bétons légers, est plus remarquable que celle produite par l'acide de sulfate de sodium (Na_2SO_4). Dans le cas de ces deux acides, les détériorations produites selon l'état des surfaces des éprouvettes, sont dépendantes de l'acide lui même, de la teneur en granulats de caoutchouc. Il est à noter, que le béton léger classique résiste moins dans le cas des deux acides. En conclusion, le processus de vieillissement par des cycles de mouillage-séchage dans une solution de 5% en volume d'acide chlorhydrique HCl, produit des pertes de masse importantes, est apparu plus agressive que la solution de 5% du Na_2SO_4 .

De nombreux facteurs peuvent gouverner la réponse d'un composite cimentaire au feu, en particulier leurs constituants qui conditionnent la distribution de la chaleur. Elle dépend, de leurs propriétés chimiques et physiques et de leurs tailles.

La dégradation des éprouvettes des différents bétons légers, sous l'effet de la température jusqu'à 1000°C, a été surveillée en observant les changements massiques. Ce qui a été constaté dans cette étude, est qu'à partir une température de 200°C, le caoutchouc a commencé à fondre, fournissant un espace à l'eau évaporée dans le béton léger pour s'échapper. En réalité, la présence des granulats de caoutchouc a permis de retarder le développement de ces fissures sous l'effet de la température élevée.

Après la déshydratation complète de la matrice cimentaire, l'apparition des fissures superficielles commence et la perte de masse devient de plus en plus significative, en particulier pour le béton léger de référence. Ces fissures ont été provoquées par l'accumulation des pressions internes et la disparition des joints de dilatation dans les bétons légers mis au feu, ce qui a entraîné des déformations dans leurs différentes parties chauffées.

Les dégradations observées sur les éprouvettes, ont commencé à être importantes à 600°C, suite aux modifications de la structure des bétons légers, à savoir, l'augmentation de la porosité, l'apparition de micro

Conclusions générales, perspectives et recommandations

et macro-fissures et la décomposition des granulats à ces températures élevées. Les pertes de masse constatées dans les bétons légers caoutchoutés sont surtout des pertes en granulats de caoutchouc. Les dégradations atteignant le béton léger de référence, sont plus remarquables, en plus des pores, des effritements, des éclatements et des écaillages, montrant un état fragile bien avancé près à s'effondrer, on constate la formation d'un réseau dense en microfissures se connectant entre eux et deviennent de plus en plus profondes.

Le béton léger caoutchouté BCM5 a enregistré une importante perte de masse de l'ordre de 56,82%, suivi par les autres bétons légers de la même composition (BCM7,5 et BCM10), la composition (BCg), a enregistré des pertes en poids qui s'approchent de celles du béton léger de référence (30%).

Malgré ceci, le béton léger caoutchouté n'est pas approprié pour des applications à hautes températures (au delà de 600°C), en raison de la combustibilité des granulats de caoutchouc et afin de prévoir une marge de sécurité et de durabilité

L'absorption d'eau du béton sec est dépendante de la vitesse d'absorption et de la porosité effective du béton. Pendant cet essai, les bétons légers caoutchoutés, ont montré un maximum d'absorption de l'ordre de 5,13%, correspondant au mélange BCg10. En ce qui concerne, la composition (BCM), BCM10 4,86%, alors que le béton léger de référence, a absorbé environ 5,09% de son poids initial.

La quantité d'air introduite dans ces bétons légers par la présence des granulats de caoutchouc, piégeant l'air dans leurs surfaces rugueuses, rend ces composites plus perméable. A une teneur inférieure à 10% et une petite taille de particules fines de caoutchouc, en plus de leur coefficient d'absorption d'eau négligeable, la porosité diminue et la compacité augmente ce qui limite la propagation de l'eau dans les composites cimentaires.

À l'issue de cette partie d'étude, les résultats d'absorption d'eau des bétons légers étudiés, âgés de cinq (05) années, contenant des granulats de caoutchouc à faibles teneurs, montrent que ces composites sont prometteurs pour le domaine de la construction. Le contrôle de l'ajout de ces granulats en quantités (< 10%) et en employant de différentes tailles pour combler les vides créés par les gros granulats, ce qui bloque et repousse l'eau, est la clé de leurs réussites à remplacer un béton ordinaire, subissant des dommages dans les périodes hivernale.

Les propriétés acoustiques, ont été affectées par la teneur en granulats de caoutchouc. Les résultats de cette étude, ont montré que ces propriétés, s'améliorent avec l'âge du béton léger, en raison de l'augmentation de sa compacité au fil du temps. Les granulats de caoutchouc, ont perturbé l'onde sonique à chaque fois où il a débouché sur l'un de ces granulats, la densité modifiée de ces bétons légers incorporant ces granulats a affecté la vitesse de propagation du son.

A 28 jours, la composition (BCg), a présenté les vitesses de propagation du son les plus importantes. Après que cinq (05) années, se sont écoulées, les mesures effectuées sur les mêmes éprouvettes, ont montré que les vitesses ont considérablement augmenté. Ce qui a été conclu, est que les bétons légers caoutchoutés de la composition (BCM), ont présentés des vitesses de propagation du son inférieures à celle du béton de référence et ceux de la composition (BCg). Ces mesures, durant ces cinq (05) années, ne sont pas capables de décrire ou prédire avec précision l'effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés

Conclusions générales, perspectives et recommandations

acoustiques des bétons légers incorporant cette matière.

Lors de cet essai, il a été montré que les bétons légers caoutchoutés, ont présenté un comportement plus élastique par rapport au béton léger de contrôle. Les facteurs ayant produit ce changement, sont la teneur en granulats de caoutchouc et l'âge de ces composites; qui ont affectés la compacité de ces composites, par conséquent, l'augmentation du module d'élasticité par rapport au jeune âge (à 28 jours).

Dans la plupart des recherches sur les impacts environnementaux, la préoccupation majeure est l'usage des matériaux innovants de qualité et répondants à aux exigences optimisés de l'environnement. Ces matériaux intéressants pour le secteur de la construction sont assez souvent des déchets, ayant des qualités prometteuses et qui ont les sujets d'analyse dans plusieurs enquêtes, afin de mettre en évidence leurs performances environnementales et de s'assurer avant tout de leurs durabilités dans les conditions pour lesquelles ils sont conçus, ainsi que leurs charges environnementales réduites en analysant leurs cycles de vies pendant lesquels ils doivent rester capables d'assumer les fonctions d'usages et de maintenir leurs niveaux de fiabilité relatifs à la sécurité. Ceci, augmente la durée de vie des constructions et réduit les frais de maintenance imprévus.

Cet analyse quantifie les charges environnementales des produits tout au long de leurs cycle, soit du berceau à l'usine soit du berceau à la tombe. Diverses ressources (naturelles et énergétiques) sont consommées et divers polluants (atmosphérique et solides) sont produits dans l'environnement se traduisant surtout par des dommages sur la santé humaine.

Dans cette recherche, la substitution d'une quantité de granulat naturel de la composition des bétons légers dans lesquels ont a proposé l'emploi des granulats de caoutchouc, a permis d'avoir un gain d'avantages environnementaux. L'impact environnemental associé à ces nouveaux bétons légers, est estimé de la phase d'extraction des matières premières à la phase de leur mise en œuvre.

Il est d'autant plus important de rappeler que les résultats obtenus, est fonction d'une unité fonctionnelle de 10 m³ de béton léger, sur une période de 30 ans considérée. Les résultats mettant en comparaison des bétons légers dont ont a substitué 5, 7,5 et 10% des granulats naturels et un béton léger classique à 100% de granulats naturels. Malgré ces taux de substitution assez faible, ces résultats ont montré ce qui suit :

Par rapport au béton léger de référence, des réductions maximisées à environ 0,73% d'émission de gaz à effet de serre par les bétons légers de la composition (BCm) pour laquelle on a substitué le sable et le gravier conjointement, l'explication qu'a été avancée est la responsabilité du transport de la majorité de ces émissions le dosage élevé en matière de ciment et les taux de substitution faibles sont les causes de cette réduction même si elle est insignifiante.

L'acidification atmosphérique, a connu aussi une réduction d'émission du SO₂ par rapport au béton léger de référence de l'ordre de 1,54% par la composition (BCm). Cet indicateur est tributaire de la quantité des matériaux extrait surtout ceux riches en soufre tel que le sable, de l'énergie consommée et de la combustion du carburant utilisé.

Les matières particulaires responsables en grande partie de la pollution d'air sont, réduites d'environ 2.65% étant un maximum enregistré par la composition (BCm) par rapport au béton léger de

Conclusions générales, perspectives et recommandations

référence. Cette poussière, qui a été générée dans sa majorité par le processus d'exploitation minière et la combustion du carburant suite au transport de la matière première, le ciment en particulier.

L'eutrophisation à son tour est réduite par rapport au béton léger de référence d'environ 2,62% pour la composition (BCm). Cette réduction d'impact est reliée à la quantité des granulats naturels substitués. Cet indicateur caractérisant les eaux de surfaces aux voisinages des sources de pollution tel que les sites de construction est favorisé par le rejet des eaux usés tels que les eaux de lavages au niveau des chantiers.

La minimisation de l'effet de destruction de la couche d'ozone par rapport au béton de référence, est de l'ordre de 1,68% pour la composition (BCm), elle est expliquée par la quantité des matériaux substitués. L'impact de la formation d'ozone photochimique, est plus faible de 3,2% pour les bétons légers de la composition (BCm). La consommation d'énergie primaire, est réduite d'environ 1,09% par les bétons légers de la composition (BCm). Généralement, cette consommation est relative au processus de transport et aux procédés énergivores pour l'obtention des matières premières. La consommation des combustibles fossiles, est réduite de 1,46% par la composition (BCm). Cette faible réduction est due à la distance de transport et aux quantités des matériaux substitués relativement faibles.

La demande d'énergie cumulée pour la réalisation des bétons légers et leurs mises en œuvre est réduite proportionnellement à la masse volumique de chacun de ces mélanges. La composition (BCm) étant la formulation la plus allégée a connu la demande en énergie la plus faible. Il convient de rappeler que la phase de service et de fin de vie des bétons légers étudiés sont exclus du cycle de vie, suite au manque d'informations relatives aux énergies consommées ou bien économisées pendant cette phase.

D'après ces résultats, on peut conclure que pour 10m^3 de béton léger et de faibles taux de substitution des granulats naturels (5%, 7,5% et 10%), tous les indicateurs d'impacts environnementaux, sont réduits légèrement. La comparaison des deux compositions de bétons légers par rapport au béton de référence, met en évidence que la composition (BCm) dont on a substitué conjointement le gravier et le sable, réduit le plus les charges environnementales, donc elle est bien avantageuse du point de vue environnemental. Par ailleurs, des taux de substitution plus élevés produisent des impacts plus faibles. La substitution des granulats tels que le sable et/ou le gravier, semble être moins prometteuse pour l'environnement, étant donné, que le ciment; le composant le plus énergivore et le plus polluant dans sa production, a été maintenu constant. Dans l'ensemble des cycles de vies des bétons légers, le transport et la quantité des granulats naturels substitués sont responsables de la majeure partie des impacts.

2. Perspectives

Cette étude ouvre la porte à d'autres recherches, afin d'exploiter ces résultats. Il serait bénéfique d'approfondir l'enquête expérimentale étudiant la durabilité des bétons légers caoutchoutés, afin d'optimiser les procédures expérimentales ainsi que le taux des granulats de caoutchouc à utiliser pour produire des nouveaux matériaux cimentaires durables, pouvant remplacer ceux consommant une quantité considérable des matériaux pris de la nature et afin de développer des prévisions plus précises sur leur comportement.

Concernant l'étude de la microstructure et son évolution avec le temps, il serait intéressant d'effectuer des analyses plus poussées sur les bétons légers caoutchoutés, sujet de cette étude, à savoir des

Conclusions générales, perspectives et recommandations

observations au MEB, afin d'étudier en particulier les réseaux de bulles d'air introduits et la distribution porale en présence des différentes proportions de granulats de caoutchouc. Ceci, permettrait de confirmer les hypothèses avancées lors de l'analyse des résultats, comme il peut être aussi, un bon moyen pour mieux maîtriser les échanges entre le matériau et son environnement. Les nouveaux éléments formés dans la matrice des composites étudiés en présence des agents agressifs, tels que les hydrates, peuvent aussi être mieux identifiés par l'étude de la microstructure, elle offre la possibilité d'étudier leurs particularités.

Concernant l'analyse des cycles de vie, les résultats sont satisfaisants mais devront être confirmés par d'autres analyses. Le plus important, c'est de reproduire cette étude avec une base de données Algériennes, qui devrait être créée, ayant plusieurs sources et hypothèses, faciles à utiliser et à exploiter, permettant d'étudier les cycles de vie des matériaux et des constructions complètes, afin de les classer en fonction de leurs caractéristiques environnementales avant d'être adoptés ou réalisés. Cette démarche, permettrait d'effectuer des analyses environnementales plus poussées sur les matériaux de construction locaux fabriqués avec des moyens disponibles en Algérie.

3. Recommandations

Les bétons légers caoutchoutés des deux compositions, se sont montrés plus durables que le béton de référence, ils ont des résistances satisfaisantes aux différentes agressions environnementales et des impacts réduits durant leurs cycles de vie.

Toutefois, avant d'utiliser un nouveau matériau dans la construction, il est nécessaire de connaître ses propriétés et d'évaluer les indices indiquant son comportement pendant son service et de s'assurer qu'il remplit les conditions de la durabilité et de l'environnement. Il est également essentiel, d'étudier ses processus de dégradation. Suit à une exposition à des conditions sévères.

Il est fortement recommandé dans un essai de s'approcher plus de la réalité des mécanismes du phénomène naturel visé dans l'essai en question, afin de le mieux reproduire.

Le concepteur doit être informé des mesures d'atténuation nécessaires pour réduire les impacts environnementaux. Il peut également, conduire à l'élaboration d'exigences moins strictes pour l'utilisateur des granulats de caoutchouc lorsque le milieu est agressif ou subissant des changements de températures extrêmes. La mise en place d'incitations attrayantes aux sujets des techniques et des coûts facilitant l'intégration de l'analyse de cycle de vie des matériaux et des constructions et promouvoir son utilisation à grande échelle par les concepteurs pour de meilleures prises de décisions.

Dans une démarche d'innovation toute la priorité, devrait être portée à la réduction des consommations énergétiques nécessaires aux activités de production des matériaux de construction et tout processus relatif à cette dernière, y compris la réduction de la consommation des carburants.

Vu leurs performances, intéressantes et leur coût réduit en termes de production et de réalisation, il faut faire des efforts pour intégrer l'idée de l'utilisation des granulats de caoutchouc dans les composites cimentaires en Algérie afin d'avoir des matériaux durables.

REFERENCES

[Aac09]	Y. Ben Achour, (2009). Analyse de l'influence de l'ajout de taux élevé des fillers calcaires sur les propriétés physiques, mécaniques, microstructurales, de transfert et de durabilité des mortiers, Thèse de doctorat, Université MENTOURI de Constatine.
[Abb09]	Abbas A., Carcassès M., Ollivier J.P, (2009). The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 52, n° 1.
[Acc00]	Accetti K.M., Pinheiro I.M., (2000). Tipos de Fibras e Propriedades do Concreto com Fibras. In: 42 ^o Congresso Brasileiro Do Concreto, Fortaleza/CE.
[Ach04]	Achoura D., Lanos Ch., Jauberthie R., Redjel B., (2004). Influence d'une substitution partielle du ciment par du laitier de hauts fourneaux sur la résistance des mortiers en milieu acide, J. Phys. IV France, Vol. 118, PP.159-164.
[Aci03]	ACI 213R-03, (2003). Guide pour béton de granulats légers structurels, Reported by ACI committee 213, American Concrete Institute.
[Ada85]	Adams C., Lamborn M., Shuler S., (1985). Asphalt-Rubber Binder Laboratory Performance. Report FHWA/TX-8571, 347-1F, Texas Department of Highways and Public Transportation.
[Ade02]	ADEM, (Mai 2002): Bilan environnemental sur les filières de recyclage: l'état des connaissances ACV. Co-édition ADEME / BIO Intelligence Service, ISBN 2-86817-663-1.
[Ade15]	ADEM (Juin 2015) : Etat des lieux de la filière de granulation des pneumatiques usages en France, Europe et dans le monde, Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par Philgea et Moringa, Contrat n° 1402C0021, Coordination technique: Karine FILMON et Eric LECOINTRE – ADEME Angers – Direction Economie Circulaire et Déchets-Service Produits et Efficacité Matière.
[Adh00]	Adhikari B., Maiti S.D., (2000). Reclamation and recycling of waste rubber. Progress in Polymer Science, Vol. 25, PP. 909-948.
[Agh13]	Mardani-Aghabaglou A., Andic C., Akir O., Ramyar K., (2013). "Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method." Cement and Concrete Composites 37: 259-266.
[Agh16]	R. Aghayari, A. Zaji, M. Ashrafy, (2016). Utilisation de la poudrette de caoutchouc des pneus recyclés dans un revêtement de béton compact (RCCP). Azian Journal of Civil Engineering (BHRG), Vol. 17, No. 7, PP. 969-984. [en Anglais]
[Ago06]	F. Agostini, (2006). Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille et Université des Sciences et Techniques de Lille.
[Ago08]	G. Agostini, F.G. Corvasce, (2008). Tire with low Thermal Expansion component. 11/243, 868. [en Anglais]
[Ago12]	L.K. Agostinho, (2012). Análise mecânica e química de placas Pré-moldadas de concreto com adição de Resíduos de borracha, Santa Maria, RS, Brasil.
[Aie10]	Aiello M., Leuzzi F., (2010). Waste tyre rubberized concrete: properties at fresh and hardened state., Waste Management, Vol. 30, PP. 1696-1704.
[Aka06]	Akasaki J., Marques A., Ricci E., Trigo A., (2006). Mechanical strength of concrete made with recycled rubber subjected to high temperatures (in Portuguese). XXXII South-American Conference on Structural Engineering, UNESP, Campinas, Brazil, pp. 10.
[Akh04]	Al-Akhras N., Samadi Mohammed M., (2004). Properties of tire rubber ash mortar. Cement Concrete Compos., Vol. 26, PP. 821-826.
[Alb05]	Albano C., Camacho N., Reyes J., Feliu J.L., Hernández M., (2005). Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing. Composite Structures, Vol. 71, PP. 439-446.
[And97]	Andeberg Y., (1997). International workshop on fire performance of high-strength concrete, NIST, Gaithersburg, md, 1997.

REFERENCES

[And00]	André L.R., Stéphane O., Les réactions sulfatiques: conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés, Bulletin Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées - 225 - Mars-Avril 2000 - Réf. 4316 - PP. 41-50.
[Ang01]	Angulo S.C., Jordan S.E., John V.M., (2001). desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. in: iv seminário de desenvolvimento sustentável e a construção civil – materiais recicláveis e suas aplicações, são paulo/sp.
[Ash10]	Ashraf R., Assoc A., (2010). Cas des études de l'empreinte écologique des bâtiments. Rapport final.
[Aze12]	Azevedo F., Pacheco-Torgal F., Jesus C., Barroso de Aguiar J.L., Camoes A.F., (2012). Properties and durability of HPC with tire rubber wastes. Construction and Building Materials. Vol. 34, PP.186-191.
[Azm08]	Azmi N.J., Mohammed B.S., Al-Mattaeneh H.M.A., (2008). Engineering properties of concrete containing recycled tire rubber. ICCBT, B 34, PP. 373-382.
[Bab09]	Babor D., Diana P., Loredana J., (2009). Environmental impact of concrete, Buletinul institutului politehnic Din Iasi, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iasi, Tomul LV (LIX), Fasc. 4, 2009Secția Construcții. Arhitectură.
[Bar82]	Baron J., Sauterey R., (1982). Le Béton Hydraulique: connaissance et pratique, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
[Bar92]	Baron J., Ollivier J.P., (1992). La durabilité des Bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris.
[Bat08]	Batayneh M.K., Marie I., Asi I., (2008). Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. Waste Manage. Waste Management. Vol. 28, PP.2171-2176.
[Baz78]	Bazant Z.P., Thonguthai W., (1978). Pore pressure and drying of concrete at high temperature. Journal of Engineering Mechanics Division, Vol. 104, No. EM5, PP. 1059-1079.
[Baz79]	Bazant Z.P., Thonguthai W., (1979). Pore pressure in heated concrete walls: theoretical prediction. Magazine of Concrete Research. Vol. 107, No. 31, pp.67-79. [en Anglais]
[Ben16]	F. Belabdelouhab, H. Trouzine, H. Hellal, B. Rahali, S. Ould Kaci, M. Medine, (2016). Comparative analysis of estimated Young's modulus of rubberized mortar and concrete, International Journal of Civil Engineering—Springer, https://doi.org/10.1007/s40999-016-0119 .
[Ben99]	Bentz D.P., Snyder K.A., (1999). Protected paste volume in concrete. Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, Cement and Concrete Research.
[Ben01]	A. Bentur, S.i Igarashi, K. Kovler, (2001). Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates, Cement and Concrete Research.
[Ben02a]	Benazzouk A., (2002). Contribution à la valorisation de déchets de caoutchouc: composites cimentaire à base de caoutchouc compact et cellulaire. Thèse de doctorat, Université de Picardie.
[Ben02b]	Benazzouk A., Queneudec M., (2002). Durability of Cement Rubber Composites under Freeze Thaw Cycles. Sustainable Concrete Construction: Proceedings of the International Conference at University of Dundee, Scotland UK 9-11, PP. 355-362. [en Anglais]
[Ben04]	Benazzouk A., Douzane O., Quéneudec M., (2004). Transport of fluids in cement-rubber composites. Cement and Concrete Composites Vol. 26, PP. 21-29.
[Ben07]	Benazzouk A., Douzane O., Langlet T., Mezzeb K., Roucoult J.M., Queneudec M., (2007). Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes. Cement Concrete Composites. Vol. 29, PP. 732-740.
[Ben09]	Bennabd E.F., (2009). Recherches – Valorisation des pneumatiques usagés dans la protection de l'environnement.
[Ben11]	Benosman A.S., Mouli M., Taibi H., Belbachir M., Senhadji Y., (2011). Resistance of polymer (PET) - Mortar composites to aggressive solutions. In. J. Engineering Research in Africa. Vol. 5, n° 1, PP.1-15.

REFERENCES

[Bet05]	S. BETHMONT, (2005). mécanismes de ségrégation dans les bétons auto-plaçants (BAP) : Etude expérimentale des interactions granulaires.
[Bie96]	Biel T.D., Hosin L., (1996). Magnesium-oxychloride cement concrete with recycled tire rubber, Transport Research Record. TRR1533.
[Big06]	M.C Bignosi, Sandrolini F., (2006). Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete. Cement Concret Research, Vol. 36, n° 4, pp.735-739.
[Bil02]	Bilan environnemental sur les filières de recyclage: l'état des connaissances ACV, Co-édition ADEME / BIO Intelligence Service, (2002). ISBN 2-86817-663-1.
[Bla00]	Blanco F., Garcia P., Mateos P., Ayala J., (2000). Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres. Cement Concrete Research
[Ble15]	Blessen S.T., Ramesh Ch.G., (2015). Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber, Journal of Cleaner Production (2015) 1-7, Journal of Cleaner Production· 1-7, Impact Factor, Vol. 3, n° 84, DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.11.019.
[Blu76]	Blundell R., Diamond C., Browne R.G., (1976). The properties of concrete subjected to elevated temperatures. Imperial College (London): CIRIA Underwater Group, 1976. 20p. Technical note n° 9, 1976.
[Bou11]	Boukari Y., (2011). Contribution à la caractérisation des bétons endommagés par la réaction alcali-silice : apports combinés de méthodes physico-chimiques et acoustiques non linéaires, Thèse de doctorat, Co-tutelle Université Lille 1 et Université de Sherbrooke.
[Bra13]	L. Brancheriau, (2013). Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites. Université de Montpellier 2.
[Bra12]	Bravo M., Brito J., (2012). Concrete made with used tire aggregate: durability-related performance.. Journal of Cleaner Production, Vol. 25, pp.42-50.
[BRO81]	P. Brown, (1981). An Evaluation of the sulfate resistance of cement in a controlled environment, Cement and concrete research, Vol.11, PP. 719-727.
[BRU05]	Brunetaud X., (2005). Thèse de doctorat en Physico-chimie des Matériaux, Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction Sulfatique interne au béton, Ecole Centrale des Arts et Manufactures – Ecole Centrale de Paris.
[Bru07]	Brunetaud X., Linder R., Divet D., Duragrin D. Damidot, (2007). Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite formation», Materials and Structures, Vol. 40, PP.567-578, DOI: 10.1617/s11527-006-9163-3.
[Buc05]	Bucea L., Khatri R., Sirivivatnanon V., (2005). Chemical and physical attack of salts on concrete, UrbanSalt 2005 Conference, 8-9 February 2005.
[Bun82]	Bungey J. H., (1982). Le test du béton dans les structures. SUNY University Press, New York.
[Cab13]	Cabeza L.F., Barreneche C., Mir O., L. Morera, J.M. Bartolí, E. Ines Fernandez A., (2013). Faible teneur en carbone et faible consommation d'énergie dans les bâtiments: revue. Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 23, PP. 536-542.
[Car92]	A. Carles -Gibergues, M. Pigeon, (1992). La durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse. Dans: J. Baron et J.P. Ollivier. La durabilité des bétons. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, Paris. ISBN: 2-85978, PP. 184-186.
[Car03]	Carino N.J., (2003). Nondestructive test methods to evaluate concrete structures», 6th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece.
[Cas98]	Castro P.F., Carino N.J.A, (1998). Tensile and non-destructive testing of FRP bars. Journal of composites for construction, February, N° 17.
[Cha05]	Chang Z.T., Song X.J., Munn R., Marosszeky M., (2005). Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. Cement Concrete Research, Vol. 35, pp.1486-1494.

REFERENCES

[Che97]	Chehebe J.R.B., (1997). Analyse du produit Cycle de vie: Outil de gestion ISO 14000. Rio de Janeiro: Quality mark, P. 104. [en Portugais]
[Cho10]	Chou L.H., Lin C.N., Lu C.K., Lee C.H., Lee M.T., (2010). Improving Rubberized Concrete by Waste Organic Sulfur Compounds. Waste Management & Research, Vol. 28, PP. 29–35.
[Cim901]	Béton et environnement : Analyse des impacts environnementaux des constructions en bétons, Cahier des modules de conférence pour les écoles d'architecture, collection technique Cimbéton, B901.
[Coh91]	Cohen D., Mahter B., (1991). Sulfate attack on concrete, Research needs, ACI Materials journal, Vol. 88, n°1, pp.62-69.
[Col07]	Colom X., Carrillo F., Canavate J., (2007). Composites Reinforced with Reused tires: Surface Oxidant Treatment to Improve the Interfacial Compatibility. Composites: Part A. Vol. 38, pp.44–50.
[Cou99]	Coutinho, J S., (1999). Agregados para Argamassas e Betões. Materiais de Construção 1, Lisboa-Portugal.
[Dao10]	M. Daouda, (2010). Méthodologie et résultats du diagnostic de l'eutrophisation du lac Nokoue (Benin), Thèse de doctorat.
[Deb10]	Debieb F., Courard L., Kenai S., Degeimbre R., (2010). Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. Cement and Concrete Composites, Vol. 32, n°6.
[Dem03]	Demirboğa R., Gül R., (2003). Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures. Energy and Buildings.
[Dem05]	Demir F., (2005). Un nouveau mode de prédiction du module élastique de béton normal et à haute résistance de logique indistinct, Cement and Concrete Research, Vol. 35, PP. 1531-1538. [en Anglais]
[Des11]	C. Desmettre, (2011). Contribution à l'étude de la perméabilité du béton armé sous sollicitations statiques et cycliques, Thèse de doctorat, Université de Montréal.
[Die13]	Diego F.R., (2013). Concrete Durability and Environmental Performance of Mixtures Containing Recycled Hazardous Waste Aggregates, These of Doctorat, University of Miami.
[Dix10]	Dixit M. K., José L. Fernandez-Solis, Sarel L., Charles H. C., (2010). Identification des paramètres pour la mesure d'énergie incarnée: Une revue de littérature. Energy and buildings, Vol. 42, PP. 1238-1247, DOI : 10.1016/j.enbuild.2010.02.016. [en Anglais]
[Dos08]	Les dossiers du CTC, (2008). Prévenir la corrosion des armatures induite par la présence de chlorures dans le béton, N°4, Cahier No. 12, p.1
[Dou06]	D. Doumont, F. Libion, (En collaboration et pour la Ministère de l'Enfance, de l'aide à la jeunesse et de la santé), Impact sur la santé des différents polluants: quels effets à court, moyen et long terme?, Série de dossiers techniques, service communautaire de promotion de la santé avec le soutien de la communauté française de Belgique, Janvier 2006, Réf. : 06-38.
[Dre83]	Dreux G., Gorisse F., (1983). Composition des bétons, méthode Dreux-Gorisse, bilan des cinq années d'application en cotes d'ivoire, annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics.
[Dur08]	Durabilité du béton armé et de ses constituants : Maitrise et approche performantielle : Synthèse de l'opération de recherche –Actes des journées : Durabilité 2006 : méthodes d'essais et applications, (2008). Laboratoire de central des ponts et chaussées
[Eeh15]	Eehab K., Mostafa A., Ahmed M., (2015). Impact Resistance of Rubberized Self-Compacting Concrete. Water Science, Vol. 29, pp.45–53.
[Eir14]	Eiras J.N., Segovia F., Borrachero M.V., Monzo J., Bonilla M., Paya J., (2014). Physical and mechanical properties of foamed Portland.
[Eld93]	Eldin N.N., Senouci A.B., (1993). Observations on Rubberized Concrete Behavior. Journal of Cement, Concrete and Aggregates.
[Els05]	El Sharief A., Cohen M.D., Olek J., (2005). Influence of lightweight aggregates on the microstructure and durability of mortar, cement and concrete reaserch, Vol. 35, PP. 1368-1376. [en Anglais]

REFERENCES

[Elv73]	Elvery R. H. (1973). Estimating strength of concrete in structures. Current Practice Sheet 10. Concrete, Vol. 11, No. 7, PP. 49–51.
[Esc08]	Escadeillas G., Hornain H., (2008). La durabilité des bétons: La durabilité du béton dans les environnements chimiquement agressifs.
[Esi07]	Esin T., (2007). Une étude sur l'analyse de l'impact environnemental du processus de production des matériaux de construction. Building and Environment, Vol. 42, n° 11, PP. 3860-3871. [en Turquie]
[Fag78]	G. Fagerlund, (1978). Frost resistance of concrete with porous aggregate, Report of cement and concrete institute in Sweden.
[Fad14]	Fadiel A., Al Rifaie F., Taher A., Fini E., (2014). Use of crumb rubber to improve thermal efficiency of cement-based materials. Am. J. Eng. Appl. Sci., Vol. 7, No. 1, PP. 1–11.
[Fat88]	Fattuhi, N., B. Hughes, (1988). SRPC and modified concretes subjected to severe sulphuric acid attack, Magazine of Concrete Research, Vol. 40, No. 144, PP.159-166.
[Fat96]	Fattuhi N. I., Clark L. A., (1996). Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. Construction and Building Materials. Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 4, PP. 229-236.
[Fed96]	Fedroff D., Ahmad S., Savas B.Z., (1996). Mechanical Properties of Concrete with Ground Waste Tire Rubber. Transportation Research Record TRR 1532.
[Fer06]	Feron C., Autuori P., Joyeux D., (2006). Vers des moyens de prévenir l'écaillage du béton en tunnel, Tunnels et ouvrages souterrains, No. 196, PP. 228-235.
[Fer98]	Ferraris CF, De Larrard F, (1998). Modified Slump Test to Measure Rheological Parameters of Fresh Concrete, Vol. 20, PP. 241–247, DOI 10.1520/CCA10417J.
[Fis11]	Fiksel J., Bakshi B.R., Baral A., Erika G., Bernhard D.Q., (2011). Comparative life cycle assessment of beneficial applications for scrap tires. Clean Technologies and Environmental Policy, Vol (13), Issu 1, pp. 19-35, https://doi.org/10.1007/s10098-010-0289-1 .
[For07]	Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G.M.S., Van Dorland R., (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing.
[Feu09]	Feuchtmayr H., Moran R., Hatton K., Connor L., Heyes T., Moss B., Harvay I., Atkinson D., (2009). Global warming and eutrophication: effects on water chemistry and autotrophic communities in experimental hypertrophic shallow lake mesocosms. Journal of Applied Ecology. Vol. 46, pp.713–723.
[Fra11]	Franzoni E., (2011). Materials selection for green buildings: which tools for engineers and architects, Procedia Engineering. Vol. 21, PP. 883-890.
[Fre09]	Freitas C., Galvão J., Portella K., Joukoski A., Filho C., (2009). Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. Química Nova, Vol. 32, pp.913–918.
[Gae03]	Gaétan A. L., Raymond M., (2003). L'évaluation des impacts environnementaux : Un outil d'aide à la décision, Préface de Normande Trempe, Editions Multi mondes.
[Gan09]	Ganjian E., Khorami M., Maghsoudi A.A., (2009). Scrap-tire Rubber Replacement for Aggregate and filler in concrete. Construction and Building Materials. Vol. 23, pp.1828–1836.
[Gan12]	Ganesan N., Raj B., Shashikala A.P., (2012). Strength and durability of self compacting rubberized concrete. Indian Concrete Journal, PP. 15–24.
[Gar07]	Garros M., (2007). Composites cimentaires incorporant des granulats de caoutchouc issus du broyage de pneus usagés: optimisation de la composition et caractérisation. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
[Gar09]	V. Garnier, J.F. Chaix, M. Rossat, C. Payan, G. Corneloup, LNDC, (2009). Caractérisation Non Destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores, Université de la Méditerranée, Aix Pce, France.

REFERENCES

[Gaw04]	Gaweska H., (2004). Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécaniques. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des ponts et chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie.
[Ges07]	Gesoglu M., Guneyisi E., (2007). Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume. <i>Mater. Struct.</i> Vol. 40, No. 9, PP. 53-964.
[Ges11]	Gesoglu M., Guneyisi E., (2011). Permeability of self-compacting rubberized concrete. <i>Construction Building Maters</i> , Vol. 25, PP. 3319-3326.
[Ges14]	Gesoglu M., Guneyisi E., Khoshnaw G., Ipek S., (2014). Abrasion and freezing-thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. <i>Construction and Building Maters</i> , Vol. 73, PP. 19-24.
[Gha05]	Ghaly A., Cahill J., (2005). Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete. <i>Can. J. Civil Eng.</i> , Vol. 32, PP. 1075-1081.
[Ghe12]	Ghernouti Y., Rabehi B., (2012). Strength and Durability of Mortar Made with Plastics Bag Waste (MPBW). <i>International Journal Concrete Structures and Materials.. Journal of Concrete Structures and Materials.</i> Vol. 6, n° 3, pp.145-153.
[Gir96]	Girodet C., (1996). Endommagement des mortiers sous sollicitations thermomécaniques: influence des caractéristiques des matériaux sur la résistance au gel interne des bétons. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
[Gou98]	Goulias D.G., Ali A.H., (1998). Evaluation of rubber-filled concrete and correlation between destructive and non-destructive testing results, <i>Cement Concrete and Aggregates</i> .
[Gud10]	Gudmundsson H., Tennoy A. & Joumard R., (2010). Criteria and methods for indicator assessment and selection. In Joumard R. & Gudmundsson H. (eds), <i>Indicators of environmental sustainability in transport</i> , Rapport INRETS, n°281, Bron, France, PP. 109-151.
[Gul97]	Gül R., Uysal H., Demirboğa R., (1997). Investigation of The Thermal Conductivity of Lightweight Concrete Made with Kocapinar's Pumice aggregate.
[Gun04]	Guneyisi E, Gesoglu M, Ozturan T., (2004). Properties of rubberized concretes containing silica fume. <i>J Cement Concrete Research</i> , Vol. 34, PP. 2309-2317, DOI 10.1016/j. cemconres. 2004. 04. 005.
[Gun16]	Güneyisi V., Gesoglu M., Naji N., İpek S., (2016). Evaluation of the rheological behaviour of fresh self-compacting rubberized concrete by using the Herschel-Bulkley and modified Bingham models. <i>Archives of civil and mechanical engineering</i> , Vol. 16, PP. 9-19.
[Guo14]	Guo Y.C., Zhang J.H., Chen G., Chen G.M., Xie Z.H., (2014). Fracture behaviors of a new steel fiber reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber. <i>Construction Building Maters</i> , Vol. 53, PP. 32-39.
[Grd14]	Grdic Z., Toplicic-Curcic G., Ristic N., Grdic D., Mitkovic P., (2014). Hydro-abrasive resistance and mechanical properties of rubberized concrete. <i>GRADEINAR</i> , Vol. 66, No. 1, PP. 11-20.
[Gru89]	Grube H., Rechenberg W., (1989). Durability of Cement Paste in Acidic Water, <i>Cement and Concrete Research</i> , Vol. 19, PP. 783-792.
[Hac14]	Hachemi S., Ounis A., Guerira B., Chabi S., (2014). Endommagement d'un élément en béton soumis au feu, 1 ^{ère} conférence internationale sur la mécanique des matériaux et des structures MSM2014.
[Hal08]	Halliday, S., <i>construction durable</i> , Butterworth-Heinemann, Sydney, Australia.
[Har14]	Harjana U., I. Yahya, R. Kristiani, E. Muqowi, S. Amri, Mazlan S., (2014). Sound Insulation and Absorption Properties of Re-claimed Waste Tire Rubber, Conference: ICAMST, At Solo, INDONESIA.
[Hee12]	G. Heerten, (2012). Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering practice using geosynthetics, Geotextiles and Geomembranes. Vol. 30, pp.43-49.
[Hei92]	Heijungs R., Guinée J.B., Huppes G., Duin R.V., Goede H.P., (1992). Environmental Life Cycle Assessment of Products: Guide, Ed. CML (Center of Environmental Science), Leiden.

REFERENCES

[Hen14]	P. Henrique R.B., T. Marra De F.L., A. Flávia S.F., L. S.P., (2014). Thuany Marra de Figueiredo Lourenço, Ana Flávia Souza Foureaux, Luiza Soares Pacheco, Comparative study of the Life Cycle Assessment of geopolymer concrete and CP-II Portland cement concrete, Built Environment, Porto Alegre.
[Her10]	A. De Herde, A. Evrard, (2010). FEBELCEM-Fédération de l'Industrie Cimentière Belge.
[Her04]	Hernández-Olivares F., Barluenga G., (2004). Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 34, PP. 109– 117.
[Hir12]	Hiroshi H., Yasuhiko S., Tamon U., (2012). Failure Behavior of RC Beams in Relation to the Extent and Location of Frost Damage, Hokkaido University, Japan, 3rd International Conference on the Durability of Concrete Structures Paper Number XX, 17-19 September 2012, Queen's University Belfast
[Ho08]	M. Ho Anh Cuong, (2008). Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface.
[Ho10]	M. Ho Anh Cuong, (2010). Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés: Application aux éléments de grande surface. Thèse de Doctorat, Université de Génie Civil, Toulouse, P. 9.
[Hol04]	Holm T.A., Ooi O.S., Bremmer T.W., (2004). Moisture Dynamics in Lightweight Aggregate and Concrete", ESCSI Publication, 9340.
[Hol14]	Holmes N., Browne A., Montague C., (2014). Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. Construction Building Materials. Vol. 73, PP. 195–204.
[How91]	Howatson A.M., Lund P.G., Todd J.D., (1991). Tableaux et données d'ingénierie. 2 nd Edition. Chapman and Hall, London. [en Anglais]
[Hu96]	Hu C., De Larrard F., Serdan T., Boulay C., Bosc F., Deflorenne F., (1996). Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete, Materials and Structures, Vol. 29, No. 10, PP. 620–631.
[Hua05]	Huang B., Shu X., Li G., (2005). Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. Cement and concrete Research, Vol. 35, fascicule 10, PP. 2008-2013.
[Hun02]	F. Hunkeler, Ch. Merz, H. Ungricht, (2002). Etudes comparatives de la résistance aux chlorures des bétons, TFB: Service de recherches et de conseils techniques en matière de ciment et béton, Rapport VSS Nr. 568.
[Hus]	Hussin, M.W., Nur Farhayu, A. , Bhutta, M.A.R., Nor Hasanah A.S.L., Study on Dry-Wet Cyclic Resistance of Geopolymer Mortars Using Blended Ash from Agro-Industrial Waste, Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologie.
[Iss13]	Issa C.A., Salem G., (2013). Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design. Construction and Building Maters, Vol. 42, PP. 48–52.
[Jac95]	S. Jacobsen, J. Marchand, H. Hornain, (1995). SEM observation of the microstructures of frost deteriorated and self-healing concretes. Cement and Concrete research, Vol. 25, No. 8, PP.1781-1790.
[Jan15]	Janez T., Zvonko C., A. Mladenovic, Aljosa S., (2015). Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA, Waste Management xxx (2015) xxx–xxx.
[Ger07]	Gercek H., (2007). Valeurs du coefficient de Poisson des roches. Int. J. Roc. Mech. Min., Vol. 44, PP. 1–13.
[Jin15]	Jinhua X., Sili C., He Y., Ting W., (2015). Crumb rubber deterioration caused by sulphate attack, 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering (IC3ME 2015)
[Jol10]	Jolliet, O., Saade, M., Crettaz, P. et Shaked, S. (2010). Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un ecobilan. 2 ^{ème} mise à jour. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes, 302 pages.
[Jos05]	Josa A., Gettu R., Aguado A., (2005). Environmental assessment of cement based products: life cycle assessment and the Ecoconcrete software tool dans Dhir, R., Dyer, T. et Newlands, M. Proceedings of the International Conference on Achieving Sustainability in Construction, University of Dundee, Écosse,, PP. 281-290.

REFERENCES

[Kal05]	Kaloush K. E., Way G. B., Zhu H., (2005). Properties of Crumb Rubber Concrete. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1914.
[Kam02]	Kamimura E., (2002). Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil. Dissertação de mestrado (Vinculada ao programa de pós-graduação em engenharia civil da UFSC). Florianópolis/SC, P. 127.
[Kha99]	Khatib Z. K., Bayomy F.M., (1999). Rubberized portland cement concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, PP. 206-213.
[Kho00]	Khoury G.A., (2000). Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. Compressive strength of concrete research. Vol. 2, No. 4, PP. 429-447.
[Kli61]	Klieger P., Hanson J.A., (1961), Freezing and Thawing Tests of Lightweight Aggregate Concrete, Journal of ACI, Vol. 32, No. 7, PP. 779-796.
[Kod08]	Kodjo S., (2008). Contribution à la caractérisation des bétons endommagés par des méthodes de l'acoustique non linéaire. Application à la réaction alcalis-silice, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, 127 pages.
[Koe03]	Koehler E.P., Fowler D.W., (2003). Measuring the workability of high fines concrete, University of Texas; Austen, USA
[Koh99]	K. Kohno, T. Okamoto, Y. Isikawa, T. Sibata, H. Mori, (1999). Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, Cement and Concrete Research.
[Kou89]	J. Kouassi, (1989). Contribution à l'auscultation dynamique des superstructures par les mesures de la célérité et de l'atténuation des ondes planes élastiques-application au béton. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris.
[Kou09]	Kou S.C., Poon C.S., (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. Cement Concrete Composition, Vol. 31, No. 2, PP. 07-13.
[Kum74]	P. Kumar. Mehta, O.E. Gjørv, (1974). A new test for sulfate resistance of cements, Journal of testing and evaluation, Vol. 2, n° 6, PP. 510-514.
[Kum93]	P. Kumar Mehta, Monteiro J. M., (1993). Concrete, structure properties and materials, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 548 p.
[Kum01]	P. Kumar Mehta, (2001). Reducing the environmental impact of concrete, point of view, concrete international, PP. 61-66.
[Kum06]	M.P. Kumar, Monteiro P.J.M., (2006). Béton: microstructure, material properties, 3 rd edition, Mc Graw-Hill, New York.
[Lar92]	De Larrard F., Le Roy R., (1992). Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances. Journal of Materials and Structures.
[Lar99]	DE LARRARD F., (1999). Concrete Mixture-Proportioning: A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series; London
[Laz13]	Laźniewska-Piekarczyk B., (2013). The type of air-entraining and viscosity modifying admixture and porosity and frost durability of high performance self-compacting concrete. Construction and Building Materials. Vol. 40, PP. 659-671.
[Lee98]	Lee H.S., Lee H., Moon J.S., Jung H.W., (1998). Development of tire-added latex concrete, ACI Materials Journal.
[Lev04]	Levy S.M., Helene P., (2004). Durability of recycled aggregate concrete: A safe way to sustainable development. Cement and Concrete Research, Vol. 34, PP. 1975-1980.
[Li98]	Li Z., Li F., Li J.S.L., (1998). Properties of Concrete incorporating Rubber Tire Particles. Magazine of Concrete Research, Vol. 50, No. 4, PP. 297-304.
[Lid92]	Lide D.R., (1991-1992). Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, Inc., 72nd edition, 1991-1992.

REFERENCES

[Lo04]	Lo T. Y., Cui H.Z., (2004). Effect of porous lightweight aggregates on strength of concrete. <i>Materials letters</i> , Vol. 58, PP. 3089-3090.
[Mac09]	A. Macias, S. Goni, J. Madrid, Limitations of Köch-Steinegger test to evaluate the durability of cement pastes in acid medium. <i>Cement and Concrete Research</i> , Vol. 29, n°1999, 2005-2009.
[Mal86]	Ab-Malek K, Stevenson A., (1986). The effect of 42 year immersion in sea-water on natural rubber, <i>Journal of materials science</i> , Vol. 21, No. 1, PP. 147-154, DOI 10.1007/BF01144713.
[Mal89]	Malhotra V., (1989). Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton, Centre Canadien de la Technologie des Minéraux et de l'Énergie, Ottawa.
[Mar00]	Marc C., (2000). Confection de bétons légers pour la fabrication d'éléments architecturaux.
[Mar05]	Marfisi E., Burgoyne C. J., Amin M.H.G., Hall L.D., (2005). L'utilisation d'IRM pour observer la structure du béton. <i>Magazine of Concrete Research</i> , Vol. 57, No. 2, PP. 101-109. [en Anglais]
[Mar10]	S. Marinkovic a., V., Radonjanin., M. Malešev., I. Ignjatovic., (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete, <i>Waste Management</i> , Vol. 30, PP. 2255-2264.
[Mar13]	A.M. Marques, J.R. Correia, J. de Brito, (2013). Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate, <i>Fire Safety Journal</i> , Vol. 58, PP. 21-25.
[Mas67]	J.C Maso, (1967). La nature minéralogique des agrégats, facteur essentiels de la résistance des bétons à la rupture et à l'action du gel, Thèse de doctorat des sciences, université de Toulouse.
[Med11]	M. Medine, (2011). Contribution à l'étude expérimentale des composites cimentaires incorporant des granulats de caoutchouc issus des pneus usagés, Mémoire de Magister, Université Djillali Liabés de Sidi Bel Abbés, soutenue le 13/12/2011.
[Med16]	M. Medine, H. Trouzine, J.B. De-Aguiar, (2016). Fresh State Properties of Concrete Incorporating Scrap Tire Rubber, <i>Periodica Polytechnica- Civil Engineering</i> , Vol. 60, n°4, PP. 611-617, DOI: 10.3311/PPci.8727.
[Med17]	M. Medine, H. Trouzine, J.B. De-Aguiar, A. Asroun, (2017). Durability Properties of Five Years Aged Lightweight Concretes Containing Rubber Aggregates. <i>Periodica Polytechnica- Civil Engineering</i> . On line first (2017) 11363, https://doi.org/10.3311/PPci.11363 .
[Men14]	Menet J-L. et Gruescu I-C., (2014). L'éco-conception dans le bâtiment: en 37 fiches outils. Paris, France, Dunod, P. 392.
[Moh97]	Mohamed S., (1997). Développement des bétons auto-nivelant à haute performance pour des travaux de réparation sous l'eau, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke (Québec), Canada.
[Moh09]	Mohammad I., Bala M., Nur A.M., Durability Performance Of Natural Rubber Latex Modified Concrete, <i>Malaysian Journal of Civil Engineering</i> , Vol. 21, No. 2, PP.195-203.
[Moh14]	Mohellebi S., (2014). Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites, Thèse de doctorat.
[Moh15a]	Ali I. Mohsin, Besma M.F., (2015). Improve the Acoustic Impedance and Thermal Conductivity of Mortar by Adding Recycled Rubber, <i>International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER) ISSN: 2249-6645</i> , Vol. 5, Issu. 4.
[Moh15b]	Mohamed K. I et al., (2015). Effect of Supplementary Cementing Materials on Fresh Properties and Stability of Self-Consolidating Rubberized Concrete. <i>International Conference on Transportation and Civil Engineering London</i> , March 21-22, pp.60-67.
[Mon00]	Monteny J., Vincke E., Beeldens A., De Belie N., Taerwe L., Van Gemert D., Verstraete W., (2000). Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. <i>Cement Concrete Research</i> , Vol. 30, No. 4, PP. 623-634.
[Mor11]	R. Mora, G. Bitsuamlak, M. Horvat, (2011). Integrated life-cycle design of building enclosures, <i>Build. Environ.</i> Vol. 46, No. 25, PP. 1469-1479. [en Anglais]
[Mor13]	Moradi M., Rivard, P., (2013). Nondestructive Assessment of Alkali-Silica Reaction in Concrete: A Review », <i>Nondestructive Testing of Materials and Structures. RILEM Book series</i> , Vol. 6, pp.317-322.

REFERENCES

[Mou58]	Al-Moudi O.S.B., (1958). Studies on the evaluation of permeability and corrosion resisting characteristics of Portland pozzolan concrete, MS Thesis, Konh Kong Fahd University of petroleum and minerals, Dhahran.
[Mun79]	Munn, R.E., (1979). Environmental Impact Assessment: Principles and Procedures. Second Edition (1975). Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE). Report no. 5. John Wiley & Sons, Toronto, P. 190.
[Moh09]	Mohamed M., Ghorbel E., Wardeh G., (2009). Durabilité au gel des bétons auto-plaçants et des bétons traditionnels vibrés, AUGC 2009 01/33.
[Moh12]	Mohammed B.S., Hossain K.M., Anwar S., Jackson T.E., Wong G., (2012). Properties of crumb rubber hollow concrete block. Journal Cleaner Production Vol. 23, PP. 57–67.
[Mur92]	Murata J., Kikukawa H., (1992). Viscosity equation for fresh concrete. ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 3, PP. 230–237.
[Nag14]	Nagesh G.K, Sandeep V., Sudharani Ch., (2014). Using tyres wastes as aggregates in concrete to form rubcrete – Mix for engineering applications, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, Vol. 03, ISS. 11 , eISSN: 2319-1163/pISSN: 2321-7308.
[Nai02]	Naik TR, Siddique R, Properties of concrete containing scrap tire rubber: An overview, The University of Wisconsin - Milwaukee, 2002. Report N°. CBU-06.REP-459. 35
[Naj10]	Najim K. B., Hall M. R., (2010). A Review of the Fresh/hardened Properties and Applications for Plain (PRC) and Self-compacting Rubberized Concrete (SCRC). Construction and Building Materials, Vol. 24, PP. 2043–2051.
[Naj12]	Najim, Khalid B., Hall, Matthew R., (2012). Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. Construction Building Mater. Vol. 27, PP. 521–530.
[Nel01]	Nelson P.O., Wayne C.H., Neil N.E., Kenneth J.W., James R.L., Mohammad F.A., Pugazhendhi T., Marcus M.Q., E. Todd Hesse, Kristin M.F., Rita B.L., (2001). Environmental impacts of construction and repair materials on surface and ground waters. Summary of Methodology, Laboratory Results, and Model Development. Transport Research Board – National Research Council. Washington D.C. National Academy Press.
[Net11]	Netinger I., Kesegic I., Guljas I., (2011). The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates. Fire Safety Journal, Vol. 46, No 7, PP. 425–430.
[Nev00a]	Neuville A. M., (2000). Propriétés des bétons, Editions Eyrolles.
[Nev00b]	Neuville A.M., (2000). La résistance du béton. Dans : propriétés de bétons. Editions Eyrolles. P. 806, ISBN: 2-212-01320-5.
[Nev09]	Neuville A.M., (2009) Lebanese Science Journal, Vol. 10, No 2, 2009.
[Nev10]	Neuville A.M., Brooks J.J., (2010). Concrete Technology. 2nd Ed. Essex: Pearson.
[Nil95]	Nilson L.O., Dans: Aguado A., Gettu R., S.P. Shah eds., (1995). The relation between composition, moisture content and durability of conventional and new concrete, Concrete technology, new Trends, Industrial applications, RILEM Workshop, Barcelona, 7-9 Sept. 1994, E and PN Spon, London 1995, P. 199.
[Nog]	Noguchi, O.h., Tomosawa, Approche rhéologique de la capacité de passage entre les barres de renforcement en béton auto-compactant, Proceedings of the 1 st international RILEM Symposium, Stockholm, PP. 59-70.[en Anglais]
[Nou94]	Noumowé N.A., Clastres P., Debicki G., Bolvin M., (1994). High Temperature Effect on High Performance Concrete: Strength and Porosity. Third CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Nice, France.
[Nou95]	Noumowé N.A., (1995). Effet de hautes températures sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances. Thèse de doctorat, INSA de Lyon.

REFERENCES

[Nur15]	Nurazuwa, M. N, Hamadab, H., Sagawab, Y., Yamamoto, D. (2015). Effect of crumb rubber on concrete strength and chlorid ion penetration resistance. <i>Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)</i> , 77(32), pp. 171–178. https://doi.org/10.11113/jt.v77.7004
[Oha95]	Ohama Y., (1995). <i>Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars</i> . Noyes Publications. New Jersey USA
[Oik06]	Oikonomou N., Stefanidou M., Mavridou S., (2006). Improvement of the bonding between rubber tire particles and cement paste in cement products, in 15th Conference of the Technical Chamber of Greece, Alexandroupoli, Greece, 25–27 October (in Greek), pp. 234–242.
[Olo02]	F.T. Olorunsogo, N. Padayachee, (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. <i>Cement and concrete research</i> , Vol. 32, PP. 179-185.
[Onj12]	Onja B., (2012). <i>Amélioration des propriétés d'interface granulat de caoutchouc/matrice Cimentaire</i> . Mémoire bibliographique, Université Paul Sabatier, Toulouse.
[Onu14]	Onuaguluchi O., Panesar D.K., (2014). Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. <i>Journal of Cleaner Production</i> , Vol. 82, PP. 125– 131.
[Os85]	G.J. Osborne, (1985). The durability of lightweight concrete made with pelletized slag as aggregate, <i>Durability of Building Materials</i> .
[Ozb11]	Ozbay E., Lachemi M., Umur K.S., (2011). Résistance à la compression, à l'abrasion et à l'absorption d'énergie des bétons caoutchoutés avec et sans scories. <i>Mater. Struct.</i> Vol. 44, PP. 1297–1307.
[Pac12]	Pacheco-Torgal F., Yining Ding B., Said J., (2012). Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview, <i>a Construction and Building Materials</i> , Vol. 30, PP. 714–724.
[Pai10]	Paine K.A., Dhir R.K., (2010). Research on new applications for granulated rubber in concrete, 163 (CM1), PP. 7–17.
[Pai12]	Paine K., Dhir R., Moroney R., Kopasakis K., (2012). Use of crumb rubber to achieve freeze thaw resisting concrete, <i>International Conference on concrete for extreme conditions</i> , Dundee, UK, PP. 486–498.
[Pan11]	T. H. Panzera, A. L. Christoforo, F. P. Cota, P. H. R. Borges, C. R. Bowen, (2011). <i>Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials</i> Dr. Pavla Tesinova (Ed.), ISBN: 978-953-307-449.
[Par13]	Parveen S., Dass A. Sharma, (2013). Rubberized concrete: needs of good environment (overview). <i>Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.</i> 3(3), 192–196. <i>Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.</i> Vol. 3, No. 3, PP. 192–196.
[Ped13]	Pedro, D., de Brito, J., Veiga, R., 2013. Mortars made with fine granulate from shredded tires. <i>Journal Mater. Civ. Eng. ASCE</i> 25, 519–529.
[Pel11]	Pelisser F., Zavarise N., Longo T., Arent B., Adriano M., (2011). Concrete made with recycled tire rubber: effect of alkaline activation and silica fume addition. <i>J. Clean. Prod.</i> 19, 757–763. <i>Journal of cleaner production</i> , Vol. 19, PP. 757–763.
[Pel12]	Pelisser F., Barcelos A., Santos D., Peterson M., Bernardin A.M., (2012). Lightweight concrete production with low Portland cement consumption. <i>Journal Cleaner Production</i> , Vol. 23, PP. 68–74.
[Per93]	J. Perdijon, (1993). <i>Le contrôle non destructif par ultrasons</i> , Hermès.
[Per03]	Perche F., Houst Y.F., Bowen P., Hofmann H., (2003). Adsorption des Ligno-sulfonates et des Polycarboxylates: Appauvrissement et méthodes Electro-acoustiques, <i>Conférence Internationale sur les super plastifiants et autres additions chimiques dans le Béton</i> , 7 th CANMET/ACI, Supplementary Papers, PP. 1- 15, U.S.A.
[Per12]	Perrot A., Lecompte T., Khelifi H., Brumaud C., Hot J., Roussel N., (2012). Contrainte et saignement des pâtes de ciments. <i>Cement and Concrete Research</i> , Vol. 42, PP. 937–944.
[Pet03]	N. Petrov., (2003). Effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causée par la formation différée de l'ettringite. Thèse de doctorat sciences appliquées, spécialité Génie civil. Université de Sherbrooke (Québec), Canada.

REFERENCES

[Pig95]	Pigeon M., Pleau R., (1995). Durability of Concrete in Cold Climates, E and FN Spon, London.
[Pie93]	Pigeon M., Marchand J., (1993). Frost durability of dry concrete products. Rapport de recherche GCS 9306, département de génie civil, Université Laval, P. 196. [en Anglais]
[Poo06]	Poon C.S., Chan D., (2006). Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick, Construction and Building Materials, Vol. 20, fascicule 8, PP. 569-577.
[Pop89]	Popovics S., Mc. Donald W.E., (1989). Inspection of the engineering condition of denvater concrete stmcme. Technical Report REMR-CS-9, U.S. Army, P. 65.
[Por72]	G.L. Porter, E.J. Benton, (1972). Concrete for long-Term Service in sulfate Environment, Cement and Concrete Research, Vol. 2, No. 1, PP. 79-90.
[Pou77]	Poutrel, J.M., R. Wasserman, (1977). Prise en compte de l'environnement dans les procédures d'aménagement Essai méthodologique sur les études d'impact, Paris, Ministère de l'environnement et du cadre de vie, P. 183.
[Pow49]	Powers T.C., (1949). The Air Requirement of Frost-resistant Concrete. Proceedings Highway Research Board, Vol. 29, pp.184-211.
[Pow53]	Powers T.C., Helmuth R.A., (1953). Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing Highw. Highway Research Board Proceedings, Vol. 32, PP. 285-297.
[Puk96]	Punkki J., O.E. GJ_RV, P.J.M Monteiro, (1996). Microstructure of high-strength lightweight aggregate concrete, 4th International Symposium on utilization of high- strength/high-performance concrete.
[Rag98]	D. Raghavan, H. Huynh, (1998). Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite, Washington DCUSA
[Rah05]	Rahal K., (2005). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate, Bulding and Environment, Vol. 42, fascicule 1, pp.407-415.
[Ram92]	Ramakrishnan V., (1992). Synthetic of highway practice 179 - Latex modified concrete and mortars. NCHRP. Washington DC.
[Rao15]	K.J. Rao, M.A. Mujeeb, (2015). A study on properties of crumb rubber concrete by destructive and non-destructive testing.
[Rao06]	Rao G.V., Dutta R.K., (2006). Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 3, No. 24, PP. 711-724.
[Ras15]	Rashad A.M., (2016). A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials, International Journal of Sustainable Built Environment, International Journal of Sustainable Built Environment, Vol. 5, PP. 46-86.
[Reb96]	Rebeiz K.S (1996). Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET (polyethylene terephthalate) waste. Construction and Building Materials, Vol. 17, fascicule 2, pp.215-220.
[Red03]	Reda Taha M.M., El-Dieb A., Abd El-Wahab M., (2003). Fracture toughness of concrete incorporating rubber tire particles. In: A. El-Dieb, M.M. RedaTaha and S.L. Lissel (Editors), Int. Conf. on Performance of Construction Materials, Cairo, Egypt
[Reg90]	Regan P.E., Arasteh A.R., (1990). Lightweight aggregate foamed concrete, Structural Engineer
[Rei14]	F. Reisser, (2014). Etude d'impact des matériaux de construction, Techniques et Logiciels.
[Ric15]	Richardson A., Coventry K., Diaz E., (2015). Rubber crumb used in concrete to provide freeze-thaw protection. In: Euro-Elecs-2015: Latin American and European Conference on Sustainable Buildings and Communities, 21-23 July 2015, Guimaraes
[Rob08]	F. Robert, H. Colina, G. Debicki, (2008). La durabilité des bétons, Chapitre 13 : La durabilité des bétons face aux incendies, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées.

REFERENCES

[Sad96]	Sadler, B., (1996). L'évaluation environnementale dans un monde en évolution: Évaluer la pratique pour améliorer le rendement. Étude internationale sur l'efficacité de l'évaluation environnementale. Agence canadienne d'évaluation environnementale et International Association for Impact Assessment (IAIA). Travaux publics et Services gouvernementaux, Ottawa, Canada, 300 pages.
[Sag01]	K.K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, A.H. Taylor, (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. <i>Cement and concrete research</i> , Vol. 31, Iss. 5, PP. 707-712.
[Sah07]	Sahmaran M., Kasap O., Duru K., Yaman I.O., (2007). Effects of mix composition and water-cement ratio on the sulfate resistance of blended cements, <i>Cement and Concrete Composites</i> , Vol. 29, PP. 159-167.
[Sai06]	Saic, (2006). <i>Life Cycle Assessment: Principles and Practice</i> . EPA, P. 88.
[Sal07]	Saleem M., Saleem S., (2007). Utilization of Waste Tires in the Production of Non- Structural Portland Cement Concrete, Degree of Master in Transportation Engineering, Faculty of Graduate Studies, at An-Najah National University, Nablus, Palestine.
[Sal16]	M. Salamah M., (2016). Investigation of mechanical and durability properties of cement mortar and concrete with varying replacement levels of crumb rubber as fine aggregate. THESIS MASTER OF Applied Science, University Of British Columbia, Okanagan.
[Sav96]	Savas B.Z., Ahmad S., Fedroff D., (1996). Freeze-thaw durability of concrete with ground waste tire rubber. <i>Transportation Research Record No. 1574</i> , Transportation Research Board, Washington DC, pp.80-88.
[Sed17]	M. Seddik Meddah, (2017). Recycled aggregates in concrete production: engineering properties and environmental impact, <i>MATEC Web of Conferences</i> 101, 05021 (2017), DOI: 10.1051/mateconf/201710105021.
[Seg00]	Segre N., Joekes I., (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste. <i>Cement and Concrete Research</i> , Vol. 30, pp.1421-1425.
[Ser13]	Serifou M., (2013). Béton à base de recyclât: influence du type de recyclât et rôle de la formulation, thèse de doctorat, Université Felix Houphouet Boigny et de l'Université Bordeaux.
[Sla86]	Slate F.O., Nilson A.H., Martinez S., (1986). Mechanical properties of high strength lightweight concrete, <i>ACI Journal</i> , Proceedings.
[Skr10]	Skripiunas G., Grinys A., Janavicius E., (2010). Porosity and Durability of Rubberized Concrete. <i>Proceedings Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies</i> , June 28 - June 30, 2010, University of Wisconsin, Milwaukee.
[Smi99]	Smith V.H., Tilman G.D., Nekola J.C., (1999). Eutrophisation: répercussions des apports en excès d'éléments nutritifs sur les écosystèmes d'eau douce, marins et terrestres. <i>Environ. Poll.</i> 100, PP. 179-196.
[Sof17]	A. Sofi, (2017), Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – A review. <i>Ain Shams Engineering journal</i> xxx (2017) xxx-xxx, Journal home page: sciencedirect.com, Journal home page: sciencedirect.com.
[Spa12]	Spangerberg J., Roussel N., Hattel J.H., Sarmiento E.V., Zirgulius G., Geiker M.R., (2012). Patterns of gravity induced aggregate migration during casting of fluid concretes, <i>Cement and Concrete Research</i> , Vol. 42, No. 12, PP. 1571–1578, DOI 10.1016/j.cemconres.2012.08.007.
[Stu11]	Stucki M., Sybille B., René I., Rolf F., (2011). Comparative Life Cycle Assessment of Geosynthetics versus Conventional Construction Material, 2011, ESU-services Ltd commissioned by European Association for Geosynthetic Manufacturers (EAGM): Uster & Zürich, CH.
[Su15]	Su H., Yang J., Ling T.C., Ghataora G.S., Dirar S., (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. <i>Journal of Cleaner Production</i> , Vol. 91, PP. 288-296.
[Suk09]	Sukontasukkul P., (2009). Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. <i>Construction Building Materials</i> , Vol. 23, PP. 1084–1092.
[Suk12]	Sukontasukkul P., Tiamlom K., (2012). Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size. <i>Construction Building Materials</i> , Vol. 29, PP. 520–526.

REFERENCES

[Tae16a]	Tae H.K., Sungho T., Chang U.C., (2016). Analysis of Environmental Impact for Concrete Using LCA by Varying the Recycling Components, the Compressive Strength and the Admixture Material Mixing, Sustainability 2016, Vol. 8, No. 389, DOI:10.3390/su8040389.
[Tae16b]	Tae H.K., Chang U.C., (2016). Environmental Impact Analysis of Acidification and Eutrophication Due to Emissions from the Production of Concrete, Sustainability 2016, Vol. 8, No. 578, DOI:10.3390/su8060578.
[Tas99]	W.A. Tasong, C.J. Lynsdale, J.C. Cripps., (1999). Aggregate-cement paste interface. Part I. Influence of aggregate geochemistry. Cement and concrete research, Vol. 29, PP. 1019-1025.
[Ter06]	Terro M.J., (2006). Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. Building and Environment, vol. 47, fascicule 5, pp. 350.
[Thi05]	M. THIERY, (2005). Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons – Prise en compte des effets cinétiques et de l'évolution de la microstructure et de l'état hydrique, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
[Tho06]	Thormark C., (2006). The effect of materials choice on the total energy need and recycling potential of a building, Building and Environment, Building and Environment, Vol. 41, pp.1019-1026. [en Anglais]
[Tho13]	Thomas C., (2013). Propriétés mécaniques et durabilité d'un béton léger Application en régions froides, dans le cadre du programme de maîtrise en génie civil pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.) Université Laval, Québec, Canada.
[Tho15]	Thomas B.S., Gupta R.C., Mehta P. Kumar, (2015). Performance of high strength rubberized concrete in aggressive environment. Construction and Building Materials, Vol. 83, PP. 320-326.
[Tia00]	Tian B., Cohen M.D., (2000). Expansion of alite paste caused by gypsum formation during sulfate attack, Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 12, No. 1, PP. 24-25.
[Tob67]	Tobio J.M., (1967). Ensayos no destructivos. Métodos aplicables a la construcción. Madrid: Editorial Alambra.
[Top95]	Topçu I.B., (1995). The properties of rubberised concretes, Cement Concrete Research. Vol. 25, No. 2, PP. 304-310.
[Top97]	Topcu I.B., Avcular N., (1997). Analysis of rubberized concrete as a composite material. Cement and Concrete Research. Vol. 27, No. 8, PP. 1135-1139.
[Top07]	Topcu I.B., Demir A., (2007). Durability of rubberized mortar and concrete. Journal of Materials and Civil Engineering. ASCE, PP. 173-178.
[Top08]	Topçu I.B., Boga A., Bilir T., (2008). Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li_2CO_3 . Waste Management, Vol. 28, No. 5, PP. 878-84.
[Tou96]	Toutanji H.A., (1996). The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. Cement and Concrete Composites, Vol. 18, PP. 135-139.
[Tou06]	Toutou Z., Roussel N., (2006). Multi scale experimental study of concrete rheology: from water scale to gravel scale, Materials and Structures, Vol. 39, No. 2, PP. 189-199, DOI 10.1617/s11527-005-9047-y.
[Tre12]	Tregger N., Gregori A., Ferrara L., Shah S., (2012). Corrélation entre la ségrégation dynamique du béton auto-consolidant et l'essai d'affaissement. Construction and Building Maters; Vol. 28, PP. 499-505. [en Anglais]
[Tro12]	Trouzine H., Bekhiti M., Asroun A., Effects of scrap tire rubber fibre on swelling behaviour of two clayey soils in Algeria, Geosynthetics International, Vol. 19, No. 2, (2012), PP. 124-132, DOI 10.1680/gein.2012.19.2.124.
[Tun11]	Tung-Chai L., Chi-Sun P., Shi-Cong K., (2011). Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures. Cement and Concrete Composites.
[Tur08]	Turatsinze A., Garros M., (2008). The modulus of elasticity and strain capacity of self compacting concrete incorporating rubber aggregates.

REFERENCES

[Uyg10]	Uygunoglu T., Topçu I.B., (2010). L'effet des particules de caoutchouc sur le retrait au séchage et les propriétés mécaniques des mortiers Auto-plaçant. Mater Des, Vol. 24, PP. 1141-1150. [en Anglais]
[Val09]	Valadares F., (2009). Mechanical performance of structural concretes containing rubber waste from waste tires. Master Dissertation in Civil Engineering, ISTUTL, Lisbon.
[Val12]	Valadares F., Bravo M., de Brito J., (2012). Béton avec granulats de caoutchouc des pneus usés: Performance mécanique. ACI Mater Journal, 109-M26, PP. 283-292.
[Ven83]	Venecanin S.D., (1983). Stresses in concrete due to thermal incompatibility of its components. Proc. Of Int. Colloquium on Material Science and Restoration, Esslingen (Germany), PP. 93-98.
[Ven84]	Venecanin S.D., (1984). Experimental study of thermal incompatibility of concrete components. Proc. Third Int. Conf. On the durability of Building Materials and components, n° 3, Espoo (Helsinki), PP. 510-520.
[Ver05]	Veronique C., (2005). Propriétés mécanique, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : Approche expérimentale et modélisation théorique. Thèse de doctorat.
[Vin]	Vincent Brahy, L'eutrophisation et l'enrichissement en nutriments, chapitre 10: l'eau et l'environnement aquatique, PP. 378-395. (http://environnement.wallonie.be).
[Vir86]	M.Virlogeux, (1986). Fabrication, contrôle et mise en œuvre du béton léger de structure. Dans M. Virgoleux, Granulats et bétons légers : Bilan de dix ans de recherche. Edition de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ISBN/2-85978-086-6.
[Viv17]	Viviana Letelier, Ester Tarela, Giacomo Moriconi, (2017). Mechanical properties of concretes with recycled aggregates and waste brick powder as cement replacement, Procedia Engineering, 1710, PP. 627-632.
[Wag13]	Wang E., Shen Z., (2013). Un indicateur hybride de la qualité des données et une méthode statistique pour améliorer l'analyse de l'incertitude dans l'ACV de l'application complexe du système e à l'analyse énergétique intégrée du bâtiment complet. Journal of Cleaner Production. 43, PP. 166-173 [en Anglais].
[Was96]	R. Wasserman, A. Benthur, (1996). Interfacial interactions in lightweight aggregate concrete and their influence on the concrete strength cement and concrete composites. Vol. 18, Iss. 1, PP. 67-76.
[Wea86]	Weast R.C., Astel M.J., Beyer W.H., (1986). CRC handbook of chemistry and Physics, 67th edition, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida.
[Web97]	S. Weber, H.W. Reinhardt., (1997). A new generation of high performance concrete : concrete with anogenous curing advanced cement based materials. Vol. 6, PP. 59-68.
[Whi91]	Whiting D., Burg R., (1991). Freezing and Thawing Durability of High-strength Lightweight Concrete. Journal of ACI, SP 126, PP. 83-100.
[Wil88]	Wilson H.S., Malhotra V.M., (1988). Development of high strength lightweight concrete for structural applications, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete.
[Xie13]	Xie H, Liu F, Yang H, Chen J, Zhang J, Zuo C, Workability and proportion design of pumping concrete based on rheological parameters, Constructions and building Materials, 44, (2013), 267-275, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.051.
[You03]	Moo-Young H., Sellasie K., Zeroka D., Sabnis G., (2003). Physical and Chemical Properties of Recycled Tire Shreds for Use in Construction. J. Environ. Eng. Vol. 129, PP. 921-929, Special ISS. Recycling of Waste Materials in Construction. [en Anglais]
[Yun13]	Yung W.H., Yung L.C., Hua L.H., (2013). A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. Construction Building Materials, Vol. 41, PP. 665-72.
[Yan06]	Yang Y.F., Han L.H., (2006). Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns. Journal of Constructional Steel research. Vol. 62, fascicule 1, PP. 1310-1324.
[Yan08]	Yang K., (2008). Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers: expérience et modélisation.

REFERENCES

[Zha89]	Zhang M.H., (1989). Microstructure and properties of high strength lightweight concrete, PhD thesis, The Norwegian University of Science and Technology.
[Zha90]	Zhang M.H., Gjorv O.E., (1990). Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, Cement and Concrete Research.
[Zha91]	Zhang M.H., Gjorv O.E., (1991). Mechanical properties of high-strength lightweight concrete, ACI Materials Journal.
[Zas11]	Zasiah T., Shovona K., Sabreena N., (2011). Environmental impact of green concrete in practice, Proceeding of the international conference on mechanical Engineering and renewable Energy 2011 (ICMERE 2011) 22-24 December 2011, Chittagong, Bangladesh, ICMERE 2011-Pi-069.
[Zhu12]	Zhu X., Miao C., Liu J., Hong J., (2011). Influence of crumb rubber on frost resistance of concrete and effect mechanism, Procedia Engineering, Vol. 23, PP. 206-213.

Liste Webiographie

www.ehponline.com	National Environmental Public Health Tracking Network/Environments	Consulté le : 22/04/2016
www.health.ny.gov	Department of health	Consulté le : 22/04/2016
www.environnement.doctissimo.fr	Club Doctissimo (Réchauffement climatique)	Consulté le : 22/04/2016
www.ciraig.org	Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services	Consulté le : 26/04/2016
www.lematindz.net	Le Matin d'Algérie (Journal)	Consulté le : 24/11/2017
https://waste-management-world.com	Waste management world	Consulté le : 14/11/2017
https://www.recycledrubberfacts.org	America drives, works, and plays on Recycled Rubber.	Consulté le : 18/11/2017
www.maghrebemergent.info	Maghreb emergent	Consulté le : 24/11/2017
www.mtp.gov.dz	Ministère de travaux publics, Algérie.	Consulté le : 06/12/2017

ANNEXES

Catégories d'impacts	Unité de référence	Béton Léger de référence	BCg5	BCg7,5	BCg10	BCm5	BCm7,5	BCm10
Changement climatique	Kg CO ₂ éq	4.09E+03	4.08E+03	4.07E+03	4.07E+03	4.06E+03	4.06E+03	4.06E+03
Acidification atmosphérique	Kg SO ₂ éq	1.94E+01	1.93E+01	1.92E+01	1.92E+01	1.91E+01	1.91E+01	1.91E+01
Formation de matière particulaire	Kg PM _{2,5} éq	3.39E+00	3.36E+00	3.34E+00	3.33E+00	3.31E+00	3.30E+00	3.31E+00
Eutrophisation	Kg N éq	8.02E-01	7.95E-01	7.91E-01	7.89E-01	7.83E-01	7.81E-01	7.83E-01
Destruction de la couche d'ozone	Kg CFC-11 éq	5.95E-08	5.92E-08	5.89E-08	5.88E-08	5.84E-08	5.84E-08	5.85E-08
Formation d'ozone photochimique	Kg O ₃ éq	3.44E+02	3.40E+02	3.38E+02	3.37E+02	3.34E+02	3.33E+02	3.34E+02
Énergie primaire totale	MJ	3.65E+04	3.63E+04	3.62E+04	3.62E+04	3.61E+04	3.61E+04	3.61E+04
Énergie non-renouvelable	MJ	3.49E+04	3.48E+04	3.47E+04	3.47E+04	3.45E+04	3.45E+04	3.45E+04
consommation des combustibles fossiles	MJ	2.73E+04	2.71E+04	2.70E+04	2.70E+04	2.69E+04	2.69E+04	2.69E+04

Comparaison des impacts environnementaux des bétons légers analysés.

Béton léger de référence	Data [Unité]	Masse [Unité]	Data [Unité]	DEC (MJ)
Pesage et malaxage des composants de 10 m ³ du béton léger de référence, masse volumique =2273 kg/m ³ .	10 m ³	--	0,06 GJ/m ³	600
Transport de 22,73 t de béton léger de référence de la centrale de production au site de construction à 30 km.	30 km	22,73 t	2,5 MJ/m ³	1704,75
Mise en œuvre de 10 m ³ de béton léger de référence (Pelle, chargeur, pompe, etc...)	10 m ³	--	15 MJ/m ³	150
Total	--	--	--	2454,75

Demande d'énergie cumulée pour la production du béton de référence

BCg5	Data [Unité]	Masse [Unité]	Data [Unité]	DEC (MJ)
Pesage et malaxage des composants de 10 m ³ de béton léger (BCg5), masse volumique =2223 kg/m ³ .	10 m ³	--	0,06 GJ/m ³	600
Transport de 22,23 t de béton léger (BCg5) de la centrale de production au site de construction à 30 km.	30 km	22,23 t	2,5 MJ/m ³	1667,25
Mise en œuvre de 10 m ³ de béton léger (BCg5) (Pelle, chargeur, pompe, etc...)	10 m ³	--	15 MJ/m ³	150
Total	--	--	--	2417,25

Demande d'énergie cumulée pour la production du béton léger BCg5

BCg7,5	Data [Unité]	Masse [Unité]	Data [Unité]	DEC (MJ)
Pesage et malaxage des composants de 10 m ³ de béton léger (BCg7,5), masse volumique=2196 kg/m ³ .	10 m ³	--	0,06 GJ/m ³	600
Transport de 21,96 t de béton léger (BCg7,5) de la centrale de production au site de construction à 30 km.	30 km	21,96 t	2,5 MJ/m ³	1647
Mise en œuvre de 10 m ³ de béton léger (BCg7,5) (Pelle, chargeur, pompe, etc...)	10 m ³	--	15 MJ/m ³	150
Total	--	--	--	2397

Demande d'énergie cumulée pour la production du béton léger BCg7,5

BCg10	Data [Unité]	Masse [Unité]	Data [Unité]	DEC (MJ)
Pesage et malaxage des composants de 10 m ³ de béton léger (BCg10), masse volumique = 2170 kg/m ³	10 m ³	--	0,06 GJ/m ³	600
Transport de 21,70 t de béton léger (BCg10) de la centrale de production au site de construction à 30 km.	30 km	21,70 t	2,5 MJ/m ³	1627,5
Mise en œuvre de 10 m ³ de béton léger (BCg10) (Pelle, chargeur, pompe, etc...)	10 m ³	--	15 MJ/m ³	150
Total	--	--	--	2377,5

La demande d'énergie cumulée pour la production du béton léger BCg10

BCm5	Data [Unité]	Masse [Unité]	Data [UNité]	DEC (MJ)
Pesage et malaxage des composants de 10 m ³ de béton léger (BCm5), masse volumique=2225 kg/m ³ .	10 m ³	--	0,06 GJ/m ³	600
Transport de 22,25 t de béton léger (BCm5) de la centrale de production au site de construction à 30 km.	30 km	22,25 t	2,5 MJ/m ³	1668,75
Mise en œuvre de 10 m ³ de béton léger (BCm5) (Pelle, chargeur, pompe, etc...)	10 m ³	--	15 MJ/m ³	150
Total	--	--	--	2418,75

Demande d'énergie cumulée pour la production du béton léger BCm5

BCm7,5	Data [Unité]	Masse [Unité]	Data [UNité]	DEC (MJ)
Pesage et malaxage des composants de 10 m ³ de béton léger (BCm7,5), masse volumique=2219 kg/m ³ .	10 m ³	--	0,06 GJ/m ³	600
Transport de 22,19 t de béton léger (BCm7,5) de la centrale de production au site de construction à 30 km.	30 km	22,19 t	2,5 MJ/m ³	1664,25
Mise en œuvre de 10 m ³ de béton léger (BCm7,5) (Pelle, chargeur, pompe, etc...)	10 m ³	--	15 MJ/m ³	150
Total	--	--	--	2414,25

La demande d'énergie cumulée pour la production du béton léger BCm7,5

BCm10	Data [Unité]	Masse [Unité]	Data [UNité]	DEC (MJ)
Pesage et malaxage des composants de 10 m ³ de béton léger (BCm10), masse volumique=2080 kg/m ³ .	10 m ³	--	0,06 GJ/m ³	600
Transport de 20,80 t de béton léger (BCm10) de la centrale de production au site de construction à 30 km.	30 km	20,80 t	2,5 MJ/m ³	1560
Mise en œuvre de 10 m ³ de béton léger (BCm10) (Pelle, chargeur, pompe, etc...)	10 m ³	--	15 MJ/m ³	150
Total	--	--	--	2310

Demande d'énergie cumulée pour la production du béton léger BCm10

